

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
katedra elektroenergetiky**



Analýza stromu poruchových stavů (FTA) a analýza možných vad a jejich důsledků (FMEA) procesu pájení a vodivého lepení v elektronice

**Fault tree analysis (FTA) and Failure mode and effect
analysis (FMEA) of a process of soldering and adhesive
conductive joining in electronics**

Autor práce: Bc. Roman Mahel
Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Mach, CSc.

květen 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Roman Mahel**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Analýza stromu poruchových stavů (FTA) a analýza možných vad a jejich důsledků (FMEA) procesu pájení a vodivého lepení v elektronice**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s typy procesů pájení a elektricky vodivého lepení v elektronice.
2. Seznamte se základní teorií FTA a FMEA a s normami vztahujícími se k FTA a FMEA.
3. Vypracujte FTA a FMEA pro jeden proces pájení v elektronice.
4. Vypracujte FTA a FMEA pro jeden proces vodivého lepení v elektronice.
5. Zhodnoťte přínos FTA a FMEA k řízení kvality procesu pájení a vodivého lepení v elektronice.

Seznam odborné literatury:

- [1] Duraj, A., Mach, P.: "Failure mode and effect analysis of a process of reflow lead-free soldering", Proc. International Seminar on Electronics Technology - Reliability and Life-time prediction, Budapest, Hungary, 2008, pp. 167-171
- [2] McDermont, R.E., Mikulak, R.J., Beauregard, M.R., "FMEA", CRC Press, 2009
- [3] Clifton A. Ericsson II, "Fault Tree Analysis Primer", Create Space Inc., 2011

Vedoucí: doc. Pavel Mach Ing., CSc.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2017/2018



doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Řípka, CSc.
děkan

V Praze dne 18. 4. 2016

Abstrakt:

V systému řízení kvality mají důležité místo spolehlivostní analýzy FTA - Fault Tree Analysis – (Analýza stromu poruch) a FMEA - Failure Mode and Effect Analysis (Analýza způsobů a důsledků poruch). Tyto dvě metody budou použity pro procesy pájení a vodivého lepení používaných v elektronice. V závěru této práce bude zhodnocen přínos FTA a FMEA v procesu řízení kvality pájení a vodivého lepení v elektronice.

Klíčová slova:

FTA, FMEA, porucha, poruchový stav, pájení, vodivé lepení

Abstract:

The quality management system has an important role of reliability analyzes FTA - Fault Tree Analysis - (Fault Tree Analysis) and FMEA - Failure Mode and Effect Analysis (Analysis of Failure Modes and Effects). These two methods will be used for soldering processes and conductive adhesive used in electronics. In conclusion, this thesis will evaluate the contribution of FTA and FMEA quality management process soldering and conductive bonding in electronics.

Keywords:

FTA, FMEA, failure, fault, soldering, conductive bonding

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování této diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 1. 5. 2016

Bc. Roman Mahel

Poděkování:

Tímto bych rád poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, kterým je Prof. Doc. Ing. Pavel Mach, CSc. za odbornou spolupráci, poskytnutí mnoha užitečných informací a za celkové vedení při tvorbě této diplomové práce. Naše spolupráce pro mne byla velkým přínosem. Také bych rád poděkoval mé rodině za podporu při studiu a psaní této diplomové práce.

OBSAH

1	Úvod	11
2	Měkké pájení a elektricky vodivé lepení.....	12
2.1	Pájení v elektronice.....	12
2.1.1	Měkké pájky	13
2.1.2	Tavidla	16
2.1.3	RoHS.....	17
2.2	Pájení přetavením (Reflow soldering)	18
2.2.1	Nanesení pájecí pasty.....	18
2.2.1	Osazení součástek	21
2.2.2	Proces přetavení	22
2.2.3	Teplotní profil	22
2.2.4	Zařízení pro pájení přetavením	24
2.3	Pájení v parách (Vapourphase soldering)	25
2.3.1	Výhody a nevýhody metody pájení přetavením	25
2.4	Pájení vlnou (Wave soldering)	26
2.4.1	Nanesení tavidla.....	27
2.4.2	Přehřev, aktivace pájených částí	28
2.4.3	Pájecí vlna.....	28
2.4.4	Chlazení	31
2.4.5	Čištění	31
3	Vodivé lepení v elektronice (ECA)	32
3.1.1	Izotropní vodivá lepidla (ICA)	33
3.1.2	Anizotropní vodivá lepidla (ACA)	34
3.1.3	Nanášení vodivých lepidel.....	35
3.1.4	Vytvrzování vodivých lepidel.....	36
4	Úvod do teorií FMEA a FTA	37
4.1	FMEA - Analýza způsobů a důsledků poruch	38
4.1.1	Úvod do analýzy FMEA	38
4.1.2	Definice základních pojmů FMEA	39
4.1.3	Postup při aplikaci analýzy FMEA	39
4.1.4	Pracovní list FMEA	40
4.1.5	Kvantitativní analýza kritičnosti	42
4.1.6	Norma související s FMEA.....	45
4.2	FTA - Analýza stromu poruchových stavů.....	46
4.2.1	Úvod do FTA	46
4.2.2	Definice základních pojmů FTA.....	46
4.2.3	Strom poruchových stavů FTA.....	47
4.2.4	Používané značky pro FTA.....	49
4.2.5	Postup při FTA.....	50
4.2.6	Kvalitativní analýza FTA.....	51
4.2.7	Kvantitativní analýza FTA.....	54
4.2.8	Norma související s FTA	55
5	FMEA a FTA procesu pájení přetavením	55
5.1	FMEA pro proces pájení přetavením.....	55
5.1.1	Vymezení hranice systému pro FMEA analýzu	55
5.1.2	Způsoby poruch procesu pájení přetavením	56

5.1.3	Pracovní list FMEA analýzy pro pájení přetavením	56
5.2	FTA pro proces pájení přetavením	57
5.2.1	Vymezení hranice systému pro analýzu	57
5.2.2	Strom poruch pro proces pájení přetavením	57
5.2.3	Minimální kritické řezy, závažnost MKR	58
6	FMEA a FTA procesu izotropního vodivého lepení	59
6.1	FMEA pro proces vodivého izotropního lepení	59
6.1.1	Vymezení hranice systému pro FMEA analýzu	60
6.1.2	Způsoby poruch procesu vodivého izotropního lepení	60
6.1.3	Pracovní list FMEA pro proces izotropního vodivého lepení	60
6.2	FTA pro proces vodivého izotropního vodivého lepení	61
6.2.1	Vymezení hranice systému pro analýzu	61
6.2.2	Strom poruch pro proces izotropního vodivého lepení	61
6.2.3	Minimální kritické řezy, závažnost MKR	61
7	Přínos FMEA a FTA pájení a vodivého lepení	62
7.1	Přínos FMEA v systému řízení kvality	62
7.2	Přínos FTA v systému řízení kvality	63
8	Závěr	64
9	Použitá literatura a ostatní informační zdroje	65
10	Seznam příloh	67

Seznam obrázků

- Obr. 1: Metody měkkého pájení
- Obr. 2: Základní rozdělení měkkých pájek
- Obr. 3: Postup nanášení pájecí pasty sítotiskem
- Obr. 4: Postup nanášení pájecí pasty přes šablonu
- Obr. 5: Detail nanesené pájecí pasty na desku plošných spojů
- Obr. 6: Teplotní profil pro pájení přetavením
- Obr. 7: Zařízení pro pájení přetavením od společnosti Heller
- Obr. 8: Pájení v parách
- Obr. 9: Jednotlivé operace pájení vlnou
- Obr. 10: Oboustranné pájecí vlny
- Obr. 11: Protisměrné pájecí vlny
- Obr. 12: Detail struktury izotropního lepení
- Obr. 13: Detail struktury anizotropního lepení
- Obr. 14: Nanášení vodivého lepidla na DPS hrotem
- Obr. 15: Množina všech minimálních kritických řezů
- Obr. 16: FTA strom poruch

Seznam tabulek

- Tab. 1: Typy používaných tavidel
- Tab. 2: Závažnost důsledků poruch
- Tab. 3: Kritéria hodnocení detekce způsobů poruch
- Tab. 4: Výskyt způsobu poruch ve vztahu k četnosti a pravděpodobnosti výskytu

Seznam zkratk a symbolů

<i>Zkratka</i>	<i>Český název</i>	<i>Anglický název</i>
ACA	Anizotropní vodivá lepidla	Anisotropic Conductive Adhesives
Ag	Stříbro	Argentum
Bi	Bismut	Bismuthium
Cd	Kadmium	Cadmium
Cr+6	Šestimocný chrom	Hexavalent Chromium
Cu	Měď	Cuprum
EAC	Elektricky vodivá lepidla	Electrically Conductive Adhesives
FMEA	Analýza způsobů a důsledků poruch	Failure Mode and Effects Analysis
FTA	Analýza stromu poruchových stavů	Fault Tree Analysis poruchových
Hg	Rtuť	Hydrargyrum
ICA	Izotropní vodivá lepidla	Isotropic Conductive Adhesives
MKR	Minimální kritický řez	Minimum Critical Cut
Pb	Olovo	Plumbum
PBB	Polybromované bifenylly	Polybrominated biphenyls
Pd	Palladium	Palladium
PBDE	Polybromované difenylethery	Polybrominated diphenyl ethers
RoHS	Omezení používání nebezpečných látek	Restriction of Hazardous Substances
RPN	Číslo priority rizika	Risk Priority Number
Sb	Antimon	Stibium
SMD	Součástky pro povrchovou montáž	Surface Mount Device
SMT	Technologie povrchové montáže	Surface Mount Technology
Sn	Cín	Stannum
Zn	Zinek	Zincum

1 Úvod

V současné době je průmysl specializující se na vývoj a výrobu elektronických zařízení jedním z největších a nejrychleji rostoucích průmyslových odvětví. Elektronická zařízení jsou nedílnou součástí našeho každodenního života. V každém odvětví lidské činnosti najdeme elektronická zařízení, na kterých je tato činnost závislá a mnohdy tyto zařízení hrají klíčovou a nezastupitelnou roli. Existuje tedy neustálý oprávněný tlak na zlepšování kvality a spolehlivosti těchto zařízení, protože v případě jejich poruchy dochází k ekonomickým ztrátám a možným bezpečnostním rizikům. Nejen z těchto důvodů jsou kladeny na kvalitu výroby elektronických zařízení neustále vyšší a vyšší požadavky.

Nejčastější součástí většiny elektronických zařízení jsou vodivé spoje. Tyto spoje zajišťují propojení jednotlivých funkčních komponent elektronických obvodů. Počet vodivých spojů v každém elektronickém zařízení je dán jeho složitostí a množstvím komponent. S počtem vodivých nebo lepených spojů se zvyšuje pravděpodobnost výskytu možné poruchy některého z těchto spojů. Pro všechny výrobce je tedy velmi důležitá kvalita každého spoje. Funkčnost všech elektronických zařízení závisí mimo jiné i na každém jednotlivém vodivém spoji v zařízení. Porucha jediného spoje může způsobit nefunkčnost celého zařízení.

Pro dosažení kvalitních vodivých spojů splňujících požadavky na elektrické a mechanické vlastnosti má zásadní vliv nejen výběr vhodných materiálů, ale i samotný proces výroby vodivých lepených a pájených spojů. V ideálním případě mají být spoje dokonale vodivé a zároveň mají splňovat požadavky na mechanickou pevnost, chemickou stálost, teplotní odolnost a mají si zachovávat své vlastnosti v čase. Těchto požadavků se výrobci materiálů pro vodivé lepení a pájení snaží dosáhnout vývojem nových materiálů a výrobci elektronických zařízení zlepšením technologických postupů výroby těchto vodivých spojů.

Technologické postupy výroby jsou procesy, které musí mít správně nastaveny každý výrobce. Bez jejich správného nastavení nelze vyrábět elektronická zařízení splňující požadavky na kvalitu a bezpečnost. Klíčovými postupy, které svým

zvládnutím a nastavením přímo ovlivňují výslednou kvalitu výrobku, jsou mimo jiné procesy vodivého lepení a pájení. Tyto procesy je nutné nastavit na místě, kde samotný výrobní proces probíhá. Mnohdy je nutné zohlednit místní okolnosti ovlivňující proces a mající vliv na výslednou kvalitu výrobku. Často až výsledek první zkušební série výrobků odhalí nedostatky výrobního procesu.

Při použití vhodných analytických metod určených pro identifikaci kritických míst, kde existují možnosti vzniku poruch, můžeme tato kritická místa možných vzniků poruch identifikovat ještě před spuštěním výrobního procesu.

K tomu se používá řada nástrojů. Patří k nim mimo jiné také analýza FMEA Analýza způsobů a důsledků poruch (Failure Mode and Effects Analysis) a FTA Analýza stromu poruchových stavů (Fault Tree Analysis). Obě analýzy jsou běžně používány tam, kde má být zajištěn kvalitní a opakovatelný proces. Jedná se o dvě metody běžně implementované do systému řízení kvality výrobců elektronických zařízení. Tyto dvě metody budou popsány a aplikovány na procesy vodivého lepení a pájení. V závěru této práce budou použité metody vyhodnoceny.

2 Měkké pájení a elektricky vodivé lepení

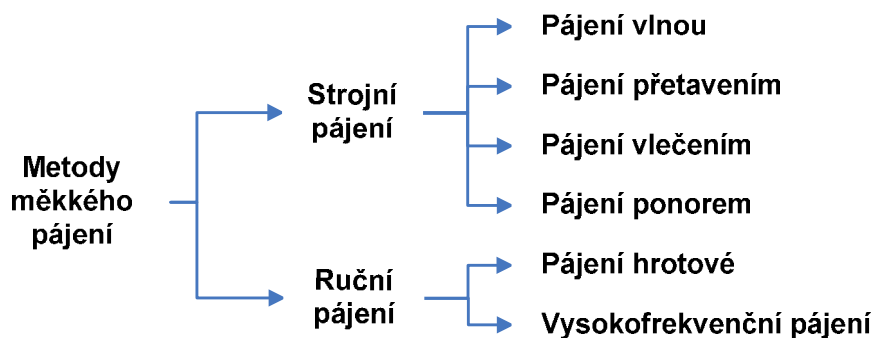
2.1 Pájení v elektronice

Pájení je technologický proces, při kterém pomocí lehkotavitelných slitin kovů (pájkou) spojujeme dvě nebo více kovových, většinou funkčních částí zařízení. V našem případě se bude jednat o funkční prvky elektronických komponent a desky plošných spojů (DPS). Při pájení dochází ke styku roztavené pájky a pájených dílů. Pájené díly musí mít vždy teplotu tavení vyšší než je teplota tavení pájky a vždy zůstávají v pevném skupenství. Pájený díl je smáčen pájkou a na jeho povrchu se vytvoří atomární vazby s roztavenou pájkou. Při pájení dochází k difuzi prvků pájených materiálů a vznikají přechodové oblasti, které obsahují intermetalické fáze, které mají jiné mechanické a chemické vlastnosti, než pájené komponenty. Tyto oblasti se vyznačují vyšší křehkostí spoje a vyšší teplotou tání než je teplota tání samotné pájky. Jelikož k růstu této

intermetalické oblasti dochází i po ukončení procesu pájení, tloušťka této oblasti se s časem zvětšuje.

Další důležitou vlastností pájených ploch je smáčitelnost jejich povrchu pájkou. V okamžiku styku pájky s pájenou plochou začnou na pájku působit dvě síly. Kohezní síly (soudržné síly mezi molekulami roztavené pájky) a adhesní síly (přitažlivé síly mezi atomy pájky a substrátu). Poměr těchto sil má vliv na smáčitelnost pájených ploch.

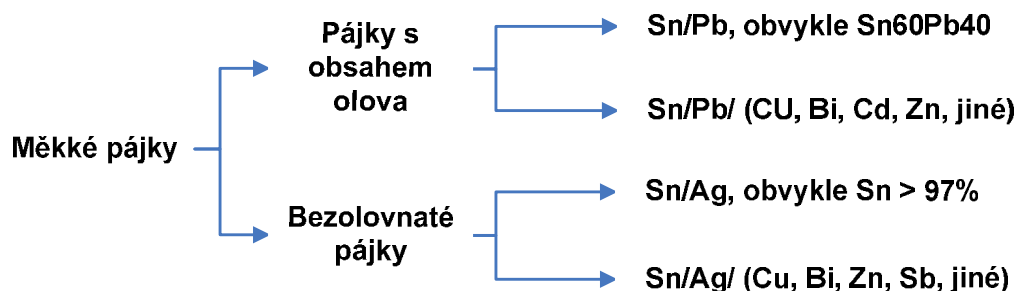
Jedny ze základních požadavků kladených na pájené spoje jsou mechanická pevnost, elektrická vodivost a stálost jejich vlastností v čase. Pro pájení elektronických komponent se téměř výhradně používá měkké pájení. Přehled možných způsobů měkkého pájení je uveden na obr. 1. [6]



Obr. 1: Metody měkkého pájení

2.1.1 Měkké pájky

Měkké pájky dělíme na pájky s obsahem olova a pájky bezolovnaté (Lead-Free nebo též někdy označované jako Pb-Free). V každé z těchto dvou skupin najdeme podskupiny pájek lišící se složením slitiny a poměrem jednotlivých prvků obsažených ve slitině. Složením a poměrem jednotlivých prvků ve slitině výrobci dosahují různých požadovaných vlastností jednotlivých typů pájek.



Obr. 2: Základní rozdělení měkkých pájek [16]

Pájky s obsahem olova

V průmyslu vyrábějícím elektroniku byla donedávna nejčastěji používaná pájka s obsahem olova jako eutektická slitina olova a cínu v poměru 63% cínu (Sn) a 37% olova (Pb). Při tomto poměru je dosaženo nejnižší teploty tavení (183°C) ze všech možných poměrů slitin cínu (Sn) a olova (Pb). [16]

Vzhledem ke směrnici EU označované jako RoHS (Restriction of the Use of Hazardous Substances), platné v České republice od 1. 7. 2006, která, kromě jiných látek, také zakazuje používání olova, bylo třeba se zaměřit na náhradu pájek s obsahem olova pájkami bezolovnatými. Je třeba podotknout, že přechod na bezolovnaté pájky nebyl stanoven striktně ke konkrétnímu datu, ale každý stát EU měl za povinnost tuto situaci řešit podle svých možností. S ohledem na počet testovaných bezolovnatých slitin a na nízké znalosti o jejich dlouhodobém chování, bylo povoleno užívat ještě po nějakou dobu olovnaté slitiny v aplikacích, kde je použití těchto pájek nutné s ohledem na bezpečnost a spolehlivost a kde by selhání spoje mohlo ohrozit např. lidský život. Je tedy možné používat bezolovnaté slitiny v automobilovém průmyslu, v letectví, v oblasti lékařských přístrojů a dalších aplikacích. [9]

Bezolovnaté pájky

Jako základní pevná složka bezolovnatých měkkých pájek je obvykle použita slitina **cínu (Sn)**, **stříbra (Ag)** s převážujícím poměrem cínu, obvykle více než 90%.

Jedním z důležitých požadavků na dnes používané bezolovnaté pájky je minimalizace jejich vlivu na životní prostředí, ekologická nezávadnost těchto pájek, ekologická nezávadnost procesů výroby a následného zpracování. Tomuto požadavku byl podřízen celý vývoj bezolovnatých pájek, který vyústil v eliminaci používání olova v pájkách pro běžné aplikace. Další požadavky na bezolovnatou pájku jsou shodné s požadavky kladenými na olovnaté pájky.

Doposud se výrobcům nepodařilo vyvinout bezolovnatou pájku, která by všemi svými vlastnostmi beze zbytku nahradila pájky na bázi Sn/Pb. V některých parametrech bezolovnaté pájky doposud nedosahují takových vlastností jako pájky s obsahem olova. Jedná se zejména o smáčivost spojovaných povrchů pájkou a mechanickou odolnost spoje, kdy olovo v pájce zajišťuje elasticitu pájeného spoje. Další vlastností, u které se nepodařilo plně dosáhnout parametrů olovnatých pájek, je vzlínavost pájky. Tuto vlastnost výrazně ovlivňuje přítomnost olova ve slitině. Také z pohledu růstu whiskerů vykazují pájky bez obsahu olova horší vlastnosti. Ve snaze o zlepšení parametrů pájecích slitin někteří výrobci do pájky přidávají další příměsi. [6]

Některé z příměsí bezolovnatých pájek jsou:

měď (Cu)	Měď je přidávána z důvodu lepší smáčivosti a v některých případech pomalejšího rozpouštění mědi z desek plošných spojů. Měď způsobuje zvýšení teploty tavení slitiny.
bismut (Bi)	Bismut snižuje teplotu tavení a zlepšuje smáčivost. Způsobuje matnější povrch spoje, což je nežádoucí v případě vizuální optické kontroly spoje.
antimon (Sb)	Antimon zlepšuje smáčivost a omezuje růst whiskerů. Také zlepšuje mechanickou pevnost spoje.
olovo (Pb)	Používání pájek s příměsí olova je v elektronice legislativně omezeno a pájky s příměsí olova jsou používány v omezené míře pouze pro speciální aplikace.

Pájecí pasty

Pájecí pasty jsou směsi pevných částic pájky a tavidla. Pevné části mohou být v podobě kuliček nebo prášku, které jsou vmíchány do tavidla. Tato směs tvoří hmotu, kterou lze tisknout na požadovaná pájecí místa. Vlastnosti pájecích past určuje jejich složení. Složení pevné části pájecí pasty je zpravidla stejné jako u pájek pro ruční pájení nebo pájení vlnou. Tavidla používaná jako součást pájecích past významně ovlivňují vlastnosti pájecí pasty. Mají stejnou funkci jako tavidla používaná pro pájení pájkami ve formě drátů nebo tyčí a navíc tavidlo v pájecí pastě funguje jako pojivo mezi částicemi pájky. Tavidlo do značné míry také určuje vlastnosti pájecí pasty pro potřeby tisku na substrát. [8]

2.1.2 Tavidla

Z důvodu zlepšení technologického procesu pájení a odstranění nežádoucích vlivů způsobujících zhoršení výsledné kvality spoje je do pájeného místa vpravováno tavidlo. Použití tavidla v procesu pájení má několik důvodů. Cílem je vždy zkvalitnění procesu pájení a tím zlepšení výsledné kvality a spolehlivosti pájeného spoje. Hlavními úkoly tavidla jsou:

- odstranění oxidů na povrchu pájených ploch
- zlepšení smáčivosti pájených ploch
- snížení povrchového napětí roztavené pájky
- ochrana před oxidací při pájení
- zlepšení přestupu tepla
- v případě pájecí pasty tvoří tavidlo pojivo mezi částicemi pájky

Odstranění oxidů na pájecích ploškách je nezbytné z důvodu vytvoření kvalitní vazby mezi součástkou a substrátem. Tavidlo zmenšuje povrchové napětí pájky a tím zajišťuje lepší smáčivost pájených částí pájkou. V případě použití některých typů tavidel je z důvodu jejich možného korozivního chování nutné tyto zbytky tavidla z pájených částí odstranit. Nutnost oplachu po pájení je dána typem použitého tavidla. Typy používaných tavidel jsou uvedeny v tabulce č.1. [11]

Typ tavidla	Základ tavidla	Aktivátor	Forma
pryskřičná	kalafuna	bez aktivátoru, halogenový aktivátor, nehalogenový aktivátor	roztok, pevná látká, pasta
	umělá pryskyřice		
organická	vodou rozpustná		
	vodou nerozpustná		
anorganická	soli	s chloridem amonným	
		bez chloridu amonného	
	kyseliny	kyselina fosforečná	
		jiná kyselina	
	zásady	aminy nebo čpavek	

Tab. 1: Typy používaných tavidel [12]

Podle chemického složení

- R - pryskyřičné neaktivované
- RMA - pryskyřičné mírně aktivované
- RA - pryskyřičné aktivované
- OA - aktivované organickými kyselinami
- IA - aktivované anorganickými kyselinami

Podle korozního působení

- F-SW1 - zbytky vyvolávají korozi
- F-SW2 - zbytky mohou vyvolávat korozi
- F-SW3 - zbytky nepůsobí korozivně

2.1.3 RoHS

RoHS (Restriction of the use of Hazardous Substances) je direktiva omezující použití nebezpečných látek v elektrických a elektronických výrobcích vydaná Evropskou komisí 27. ledna 2003. Tato direktiva vstoupila v platnost 1. července 2006. Cílem direktivy RoHS je zákaz používání nebezpečných látek při výrobě elektrického a elektronického zařízení a tím přispění k ochraně lidského zdraví a životního prostředí.

Direktiva RoHS zakazuje použití následujících látek:

- kadmium (Cd)
- rtuť (Hg)
- olovo (Pb)
- šestimocný chróm (Cr+6)
- polybromované bifenyly (PBB)
- polybromované difenylethery (PBDE)

Používání zařízení obsahující výše uvedené látky nad určený limit je direktivou zakázáno. Direktiva však připouští výjimky pro vybraná zařízení z důvodu obtížné nahraditelnosti s ohledem na bezpečnost a spolehlivost těchto zařízení. [9]

2.2 Pájení přetavením (Reflow soldering)

Jedním ze způsobů měkkého pájení v elektronice je pájení přetavením. Princip tohoto způsobu pájení spočívá v nanesení pájecího materiálu na pájené místo a následné osazení pájené součástky do nanesené pájecí pasty. Poté se deska plošných spojů s takto osazenými součástkami vystaví teplotě vyšší, než je bod tavení pájky. V důsledku toho dojde k roztavení pájecí pasty a připájení osazených součástek. Tato metoda se zpravidla používá v aplikacích vyžadujících vyšší technologickou úroveň nebo jsou kladeny vyšší požadavky na kvalitu.

2.2.1 Nanesení pájecí pasty

Pro nanesení pájecí pasty před samotným osazením součástek jsou používány tři základní způsoby:

Dispenzerem

Nanášení pájecí pasty dispenzerem se používá při ručním i automatickém nanášení pájecí pasty. Může být použito zařízení pro automatické vytlačování pasty ze zásobníku. Pasta je vytlačována ze zásobníku do trysky, přes kterou se pájecí pasta

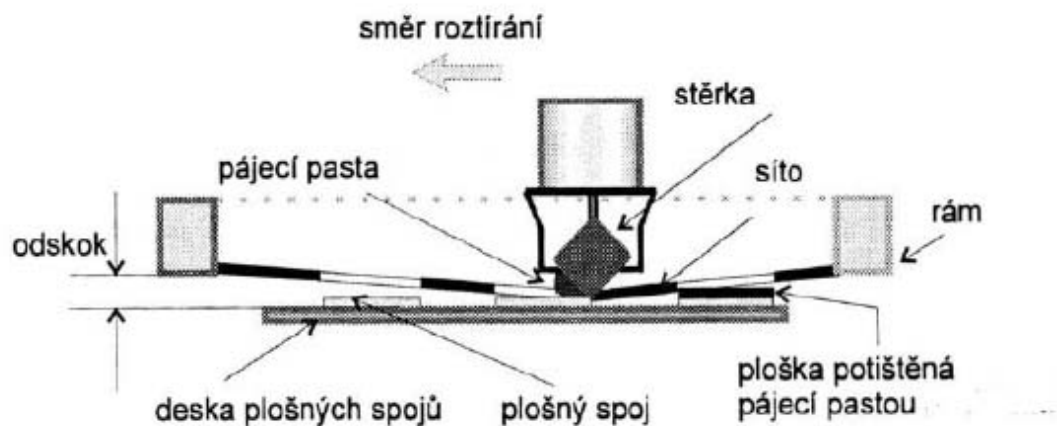
nanášší na požadované místo. Tato metoda se používá pro malé série výrobků, nebo tam, kde se osazují různé druhy desek.

Sítotisk

Pro nanášení pájecí pasty sítotiskem se používá síto, přes které je pájecí pasta protlačována na desku plošných spojů. Síto pro tisk pájecí pasty je tvořeno sítčkou, která je potažena materiálem citlivým na UV záření. Tento materiál, nazývaný fotorezist, je buď pozitivní, nebo negativní. Pozitivní fotorezist je nerozpustný ve vývojce a rozpustným se stává až po ozáření. Negativní fotorezist je rozpustný ve vývojce a nerozpustným se stává po ozáření.

Popišme si proces maskování síta pokrytého pozitivním fotorezistem: výroba síta probíhá tak, že místa, přes která má být nanášena pájecí pasta, tedy místa, kde potřebujeme otevřít „okno“ pro tisk pájecí pasty, jsou exponována UV zářením. Následným chemickým procesem, zpravidla sprchováním síta vývojkou, je z exponovaných míst odstraněna vrstva ozářeného fotorezistu a na nosné síťce zůstávají pouze motivy, které nebyly osvětleny UV zářením. V místech, kde je fotorezist odstraněn, je síto průchozí pro tisk pájecí pasty.

Takto maskovaná síťka je umístěna, v rámu, nad desku plošných spojů. Po celé délce jedné strany sítky se nanese pájecí pasta. Tato pasta se rozetře stěrkou, jejíž pohyb je směřován od jedné strany sítky na druhou a zpět (viz obr. 3). V místech, kde jsou v maskovaném sítu otevřena „okna“, se pasta protlačí na pájecí plošky na plošném spoji. Při nanášení pájecí pasty se síto prohýbá v místě, kde se právě nachází stěrka. Tloušťka nanesené pájecí pasty je dána tloušťkou sítky a velikostí částic pájecí pasty. Jako materiál stěrky se zpravidla používá silikonová pryž. Stěrka se při nanášení pasty pohybuje tam a zpět, aby se zamezilo klínovitosti tloušťky vrstvy. [6]

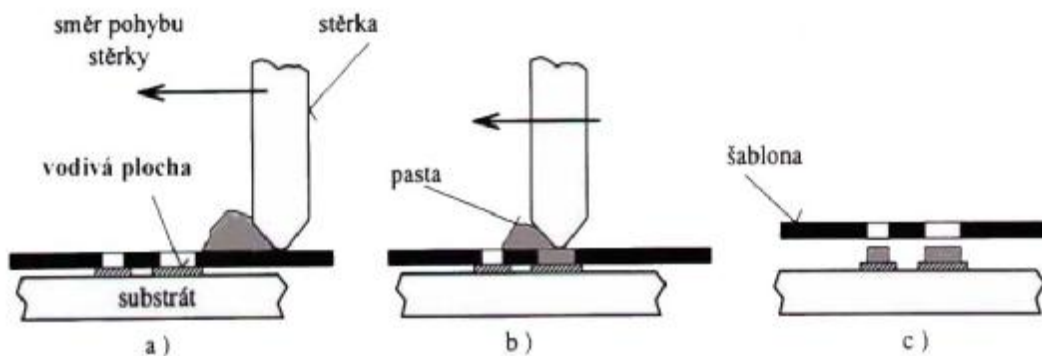


Obr. 3: Postup nanášení pájecí pasty sítotiskem [6]

Šablonový tisk

Touto metodou se pájecí pasta na desku plošných spojů nanáší přes šablonu tvořenou kovovou planžetou z nerezové oceli, bronzu, mědi či jiného kovu nebo slitiny. Šablona má v místech, kde má být nanесena pájecí pasta, vytvořeny otvory. Ty jsou buď vyleptány, vyřezány laserem nebo vodním paprskem.

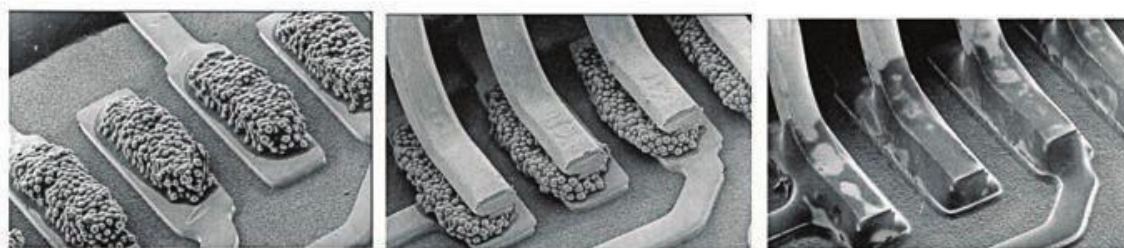
Přes tyto otvory je na desku plošných spojů pomocí tvrdé stěrky nanáшена pájecí pasta. Po nanесení pájecí pasty na desku plošných spojů se šablona zvedne a na místech otvorů v šabloně zůstává nanесená pájecí pasta. Postup nanášení pájecí pasty přes šablonu je znázorněn na obr. 4.



Obr. 4: Postup nanášení pájecí pasty přes šablonu [7]

Oproti síťotisku leží šablona z kovu (obvykle nerezové oceli, mosazi nebo bronzu) při protlačování pasty přímo na desce plošných spojů.

Detaily nanesené pájecí pasty na desce plošných spojů před osazením součástky, po osazení součástky a po jejím zapájení je zobrazen na obr. 5. Je zde v detailu vidět struktura pájecí pasty, kde jsou patrná jednotlivá zrnka (kuličky) pájecí slitiny.



Obr. 5: Detail nanesené pájecí pasty na desku plošných spojů. Na prvním obrázku zleva je patrné nanesení pájecí pasty před osazením součástek, na druhém obrázku zleva po osazení součástek a na třetím obrázku po přetavení [8]

2.2.1 Osazení součástek

Po nanesení pájecí pasty na plošky plošného spoje jsou do nanesené pasty osazeny součástky. Součástka musí být na desku plošných spojů umístěna s dostatečnou přesností. V případě nepřesného usazení součástky může dojít pouze k částečnému připájení nebo k nežádoucímu propojení sousedních kontaktů součástek na desce plošných spojů.

Při použití pájek s obsahem olova dochází po natavení pájky k vystředění součástek na pájecích ploškách (tomuto efektu se říká „self alignment“). Tento efekt je způsoben dynamickými silami povrchového napětí roztavené pájky a je schopen vystředit součástky až do 50 % přesahu součástky mimo pájecí plošky. U bezolovnatých pájek k tomuto efektu nedochází.

Součástky se osazují na desku plošných spojů osazovacími stroji („pick and place machine“). Tyto stroje bývají automatické a mají až 10 osazovacích hlav, které jsou

samostatně programovatelné a pracují paralelně. V případě jednotlivých či unikátních desek je možné součástky osadit i ručně. V tomto případě je však přesnost osazení výrazně nižší než při osazení osazovacím strojem.

2.2.2 Proces přetavení

Způsoby přenosu tepla při pájení přetavením

Po osazení součástek do nanesené pájecí pasty je nutné zajistit roztavení pájecí pasty tak, aby roztavená pájka vytvořila požadované spojení pájených součástí. Při tomto procesu je nezbytně nutné dodržet podmínky, které zajistí bezpečné zahřátí spojovaných částí nad teplotu tavení pájky po nezbytně nutnou dobu a následné ochlazení celé sestavy tak, aby nedošlo k poškození některých komponent sestavy. Přenos tepla mezi zdrojem a pájenou sestavou může být realizován několika způsoby. Nejčastější používané metody přenosu tepla jsou tyto:

- konvekční pájení
- pájení infraohřevem
- pájení laserem
- kondenzační pájení
- kontaktní metody pájení

2.2.3 Teplotní profil

Pro dosažení kvalitních a opakovatelných pájených spojů je nezbytné nastavení správného pájecího teplotního profilu. Je žádoucí, aby při pájení byly pro každý spoj dodrženy stejné podmínky. Tyto pájecí podmínky musí být vhodně zvoleny s ohledem na pájené součástky, DPS i použitou pájecí pastu. Tohoto lze dosáhnout vhodným nastavením časů a teplot v průběhu jednotlivých fází pájecího procesu.

Graf nastavení teplot v čase se nazývá teplotní pájecí profil (schematicky je teplotní profil znázorněn na obr. 6). Cílem teplotního pájecího profilu je dosažení dostatečné teploty desky a komponent nad teplotou tavení pájecí pasty tak, aby nemohlo dojít k poškození žádné z komponent pájené sestavy a zároveň bylo zajištěno dosažení

teploty potřebné k přetavení pájky a vytvoření kvalitního pájeného spoje. Charakteristika tedy musí být navržena s ohledem na vlastnosti pájených součástek a DPS.

První část pájecí charakteristiky definuje čas, za který dosáhne teplota pro přehřev definované úrovně. Sklon charakteristiky určuje nárůst teploty v čase. Jestliže by rychlost nárůstu teploty překročila maximální povolený sklon charakteristiky, může dojít k poškození některých komponent v důsledku tepelného šoku.

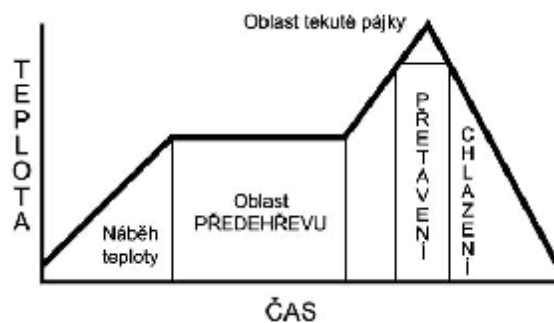
Po dosažení požadované teploty pro přehřev je dále udržována konstantní teplota po stanovený čas. Tato část charakteristiky je nejdelším úsekem procesu. Teplota přehřevu se volí v závislosti na typu použitého tavidla. Může se pohybovat v rozmezí 100°C až 170°C. V této části procesu dochází k aktivaci tavidla a prohřátí celé pájené sestavy tak, aby bylo dodáno dostatek tepelné energie i do míst s vysokou tepelnou vodivostí jako jsou například rozsáhlé motivy na desce plošných spojů, které způsobují větší odvod tepla a tím více ochlazují pájený spoj, což může způsobit nedostatečné prohřátí pájeného spoje. Tato skutečnost může mít negativní vliv na kvalitu pájeného spoje. Ve fázi přehřevu je dodáno 60 - 70% celkové tepelné energie potřebné pro proces přetavení.

Třetí část charakteristiky definuje nárůst teploty na maximální požadovanou hodnotu za daný čas. V této části dochází k tavení pájky a dodáváme již jen menší část celkové energie potřebné pro přetavení (přibližně 30 - 40%). V horní části charakteristiky dochází k překročení teploty tavení pájky, která se v tomto bodě začíná tavit. Teplota nad bodem likvidu je ještě po určitý čas zvyšována na maximální definovanou teplotu tak, aby bylo bezpečně dosaženo požadované teploty tavení ve všech částech pájené sestavy.

Po dosažení maximální teploty charakteristiky začíná fáze chlazení. V této fázi dochází k odebírání tepelné energie z pájené sestavy. Tak jako je definován nárůst teploty v čase při zahřívání, je důležité dodržet maximální definovaný pokles teploty v čase. Při nedodržení tohoto postupu dochází k nadměrné tvorbě oxidů na pájeném spoji, nebo k poškození pájené sestavy. V této fázi je velmi důležitá eliminace mechanických otřesů, protože pájka ještě není dostatečně ztuhlá a hrozí poškození pájeného spoje nebo pohyb součástek vůči substrátu.

Důležité body teplotního pájecího profilu jsou:

- maximální rychlost změny teploty
- maximální možná teplota
- čas nad teplotou tavení pájky



Obr. 6: Teplotní profil pro pájení přetavením

2.2.4 Zařízení pro pájení přetavením

Zařízení pro pájení přetavením může být v provedení od malé pece určené pro kusovou výrobu, až po velmi sofistikované zařízení používané pro průmyslovou výrobu, kde je kladen důraz na množství zpracovaných kusů za jednotku času. Na obr. 7 je zobrazen segment výrobní linky z produkce společnosti Heller, který je určen pro pájení DPS metodou přetavením.



Obr. 7: Zařízení pro pájení přetavením od společnosti Heller [10]

Nevýhody

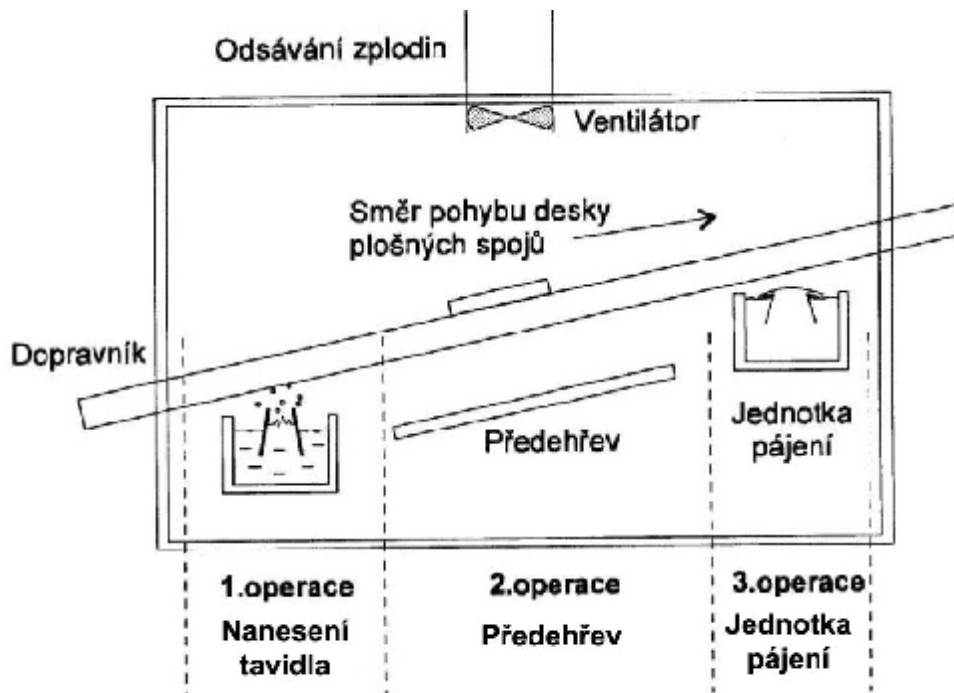
Nevýhodou této technologie je její cena. Cena pájecí pasty je výrazně vyšší než cena pájky v tyčích. Proces nanášení pájecí pasty na kontakty DPS je z technologického hlediska citlivý na chyby, které způsobují nepřesné nanesení pájecí pasty, stejně jako množství použité pasty pro dané pájené místo. Tyto skutečnosti mohou být mnohdy příčinou závady pájeného spoje. Také odchylky pájecího profilu mohou způsobit poškození pájené sestavy, nebo nekvalitní pájený spoj. Další nevýhodou v porovnání s pájením vlnou je větší časová náročnost.

2.4 Pájení vlnou (Wave soldering)

Pájení vlnou patří mezi nejpoužívanější metody průmyslového strojního pájení (viz obr. 9). V první fázi pájecího procesu se tavidlem smáčí celá spodní část pájené desky plošných spojů. Po nanesení tavidla se v části předeřevu zajistí aktivace tavidla. Tímto se odstraní oxidy z pájených ploch a zlepší podmínky pro vytvoření kvalitního pájeného spoje.

Základním principem pájení vlnou je tažení DPS osazené součástkami přes vrchol vlny roztavené pájky. Osazená deska plošných spojů je uchycena k dopravníku, který zajistí plynulý průchod DPS s osazenými součástkami skrz pájecí linku. Na vrcholu vlny dochází ke smáčení celé pájené desky a na částech určených k pájení zůstává pájka, která vytvoří požadovaný pájený spoj.

Hlavní výhodou pájení vlnou je možnost vysoké úrovně automatizace, která zajistí plynulý proces generující velký počet kvalitních pájených spojů. Tato metoda je v případě výroby velkých sérií ekonomicky výhodná a rychlá. Pájet vlnou lze jak desky osazené součástkami pro klasickou montáž, tak i desky osazené SMT nebo smíšenou montáží. [6]



Obr. 9: Jednotlivé operace pájení vlnou [6]

2.4.1 Nanesení tavidla

První fází pájení vlnou je nanesení tavidla na pájené plochy součástek a desky plošných spojů. Nanesení tavidla může být realizováno několika způsoby. Možné typy použitých dávkovačů tavidla jsou:

- ultrazvukový dávkovač
- pěnový dávkovač
- sprejový dávkovač
- dávkovač s rotujícím kartáčem

Při průchodu pájené sestavy nad dávkovačem tavidla se smáčí spodní část desky plošných spojů a dochází k nanesení tavidla na celou spodní plochu desky. Hned za dávkovačem se nachází tryska nebo štěrbiná sloužící pro odstranění přebytečného tavidla z desky plošných spojů.

2.4.2 Předehřev, aktivace pájených částí

Dalším krokem procesu pájení vlnou je předehřev. Předehřev je zpravidla zajištěn konvekci, nebo tepelným zářením. Teplotní profil procesu předehřevu má dvě části. První část je oblast náběhu teploty a druhá je oblast konstantní teploty, při které dochází k aktivaci tavidla.

V první části předehřevu se zvyšuje teplota pájené sestavy na definovanou teplotu pro předehřev podle daného teplotního profilu. Tento nárůst teploty v čase nesmí překročit maximální definovaný sklon pájecí charakteristiky, jinak by mohlo dojít k poškození pájených součástí. V této fázi se začínají odpařovat rozpouštědla obsažená v tavidlech a spouští se aktivace tavidla naneseného na pájenou sestavu.

V druhé části předehřevu zůstává teplota konstantní po dobu definovanou teplotním profilem, při které probíhá aktivace tavidla. Na teplotě definované pro předehřev sestava setrvává po čas definovaný teplotním profilem. V této fázi pájecího procesu je zajištěno důkladné prohřátí celé sestavy. Důkladné prohřátí celé sestavy je důležité z důvodu omezení teplotního šoku při styku desky plošných spojů s roztavenou pájkou. Dále je žádoucí odpaření zbytků tavidla z DPS a pájených součástek.

2.4.3 Pájecí vlna

Po nanesení tavidla, jeho aktivaci a předehřátí DPS s osazenými součástkami následuje proces pájení vlnou. Tento způsob pájení je schopen pájet široké spektrum typů DPS od jednostranných přes dvoustranné až po vícevrstvé DPS včetně desek osazených součástkami pro povrchovou montáž. Při použití technologie pájení vlnou nedochází k tvorbě oxidů na vrcholu vlny, což má pozitivní vliv na kvalitu výsledných spojů. Pájený spoj vzniká při průchodu DPS vrcholem vlny. Pájecí systémy jsou často konstruovány s nakloněným dopravníkovým systémem, který zajišťuje omezení tvorby krápníků za vrcholem vlny. Konfigurace s nakloněným pájecím dopravníkem zajistí účinnější stékání roztavené pájky zpět do vlny a tím omezí tvorbu nežádoucích krápníků. [6]

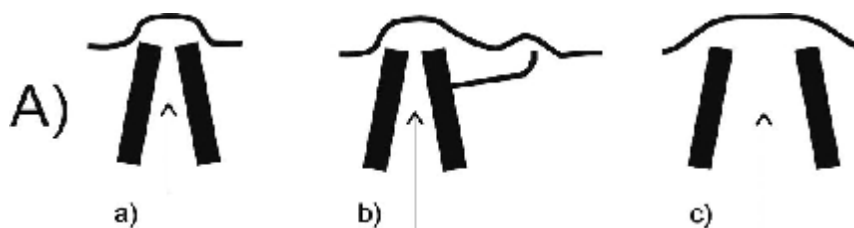
Pájecí zařízení

Základní části zařízení pro pájení vlnou jsou vyhřívaná nádrž na pájecí slitinu, čerpadla a trysky, která zajišťuje vytvoření pájecí vlny vhodných parametrů. V nádrži je udržována teplota vyšší než eutektická z důvodu zamezení tvorby krystalů jednotlivých složek pájky. V současné době jsou nejčastěji používané typy pájecích vln jednoduchá, dvojité a dutá vlna.

Konstrukce vlny

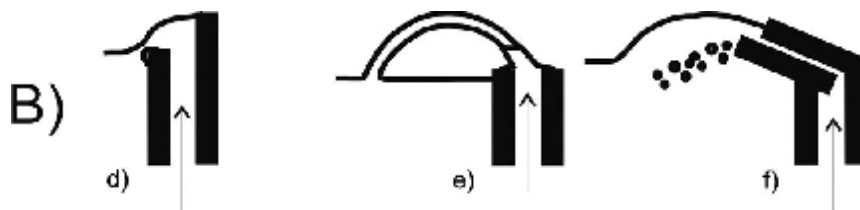
Snahou každého výrobce je vyrobit vlnu, která by zajistila co možná nejlepší výsledek procesu pájení. V současné době výrobci používají dva druhy pájecích vln, od kterých se odvíjí konstrukce daných pájecích zařízení.

První skupinu A tvoří oboustranné pájecí vlny. Tuto skupinu pájecích vln tvoří tryska, přes kterou je čerpadlem tlačena roztavená pájka. Pájka z trysky vytéká na obě strany, proto označení „oboustranné vlny“. Na obr. 10 jsou zobrazeny nejčastěji používané oboustranné vlny.



Obr. 10: Oboustranné pájecí vlny, a) běžně používaná jednoduchá, b) dvojité vlna tvořená jednou tryskou, c) běžně používaná vlna s větší šířkou [6]

Druhou skupinou pájecích vln označenou B tvoří tzv. zpětné vlny. Proud těchto vln směřuje proti směru pohybu pájené sestavy (viz obr. 11).



Obr. 11: Protisměrné pájecí vlny, d) delta vlna, e) dutá vlna, f) turbulentní vlna [6]

Dvojitá vlna

Použitím technologie pájení dvojitou vlnou lze odstranit nedostatky, které vykazuje pájení jednoduchou vlnou. Při použití jednoduché vlny nemusí dojít k propájení všech částí spojů a na pájené straně DPS se mohou vyskytnout „stíny“, kam se roztavená pájka nedostane a vzniknou nesmáčená místa. Tyto nedostatky odstraňuje technologie pájení dvojitou vlnou, kdy dochází ke smáčení celé pájené plochy a tím se zajistí propájení všech spojů. Technologie dvojité vlny je založena na použití dvou čerpadel, kdy každé z nich napájí jednu trysku. První tryska vytváří turbulentní vlnu ve směru pohybu desky PCD. Druhá tryska vytváří širokou laminární oboustrannou vlnu zajišťující požadovanou kvalitu pájení. Tento systém umožňuje pájení součástek typu SMD s vyšší technologickou náročností pájení. Nevýhodou pájení dvojitou vlnou je zpracování tavidla při průchodu první vlnou a z toho vyplývající možnost tvorby oxidu při průchodu druhou vlnou. [6]

Dutá vlna

Vlastnost jednoduché duté vlny je, že silný proud pájky stahuje pájenou desku a vývody součástek dolů a není tedy nutné ohýbat vývody součástek z důvodu jejich fixace. Vyhne se též použití držáků a nástavců zajišťujících polohu jednotlivých součástek.

Teplotní profil

Teplotní profil pro pájení vlnou se liší především dle typu použité technologie. Například dvojitá vlna namáhá pájený spoj dvakrát, což musí být zohledněno v pájecím profilu. Nastavení teplotního profilu ovlivňuje též použitý druh tavidla a vlastnosti pájené DPS a osazených součástek.

Odstranění přebytečné pájky

Spoj vznikne průchodem pájené sestavy vrcholem pájecí vlny. Některé konstrukce dopravníků dříve využívaly vodorovnou konfiguraci. Při této vodorovné konfiguraci však pájka v některých případech nestačí stéct zpět do vlny, což je příčinou

vzniku nežádoucích krápníků a můstků na pájené sestavě. Tento nežádoucí efekt se dá omezit nastavením vyšší teploty pájky a rychlostí vlny oproti rychlosti posuvu přepravníku. Tímto se sníží povrchové napětí a omezení se vznik krápníků a můstků. Potlačení vzniku krápníků a můstků se zajišťuje také nakloněním dopravního systému pájené sestavy, a tím se podpoří stékání pájky zpět do vlny. [6]

Připouštění oleje

Účinnou metodou snižování povrchového napětí při pájení je připouštění oleje do vlny a tím zabránění vzniku krápníků a můstků. Pro zlepšení účinnosti této metody je nutné zajistit vstřikování oleje přímo do pájeného místa. Po procesu pájení je nutné odstranit zbytky oleje z pájené sestavy, což tento proces komplikuje. [6]

2.4.4 Chlazení

Cílem procesu chlazení je definované snížení teploty pájené sestavy a samotného spoje. Dostatečně rychlým ochlazením zabráníme vytvoření intermetalických sloučenin snižujících vodivost a pevnost spoje. Příliš rychlé chlazení však může způsobit teplotní šok a pnutí vedoucí k poškození některých částí pájené sestavy. Z tohoto důvodu je nutné optimální nastavení procesu chlazení.

2.4.5 Čištění

Při použití agresivních tavidel a olejů je nezbytné odstranění zbytků těchto látek. Zbytky agresivních látek mohou způsobit korozi a následné závady zařízení. Čištění může být zajištěno např. v ultrazvukových čističkách nebo tlakovým ostřikem. Pro čištění polárních látek používáme polární rozpouštědla, u nepolárních látek nepolární rozpouštědla. V minulosti byly k čištění s úspěchem používány fluorované uhlovodíky (freony). Jednalo se o velmi účinné prostředky pro odstranění tavidel na bázi pryskyřic. Tyto látky jsou neekologické, proto byly nahrazeny bezfreonovými sloučeninami, například na bázi vody a přísad (citronové silice). Pro odstranění kapaliny z DPS je možné použít vzduchový nůž („air knife“), což je proud horkého vzduchu odstraňující z DPS zbytky tekutin a nečistot po oplachu.

3 Vodivé lepení v elektronice (ECA)

Vodivé lepení v elektronice se používá jako alternativa měkkého pájení. Je realizováno speciálními lepidly, pro něž je používána zkratka ECA (Electrically Conductive Adhesives). Vodivým lepením se zajistí vodivé spojení součástky se substrátem. Na vodivě lepený spoj máme podobné požadavky jako na spoj pájený. Základními požadavky jsou mechanické spojení součástky s připojovací ploškou na plošném spoji a vytvoření vodivé vazby zajišťující elektrické propojení. Stálost parametrů lepeného spoje v čase je dalším důležitým parametrem vodivě lepeného spoje. Technologie vodivého lepení je používána zejména v následujících případech:

- pro vodivé připojování součástek, kterým hrozí poškození teplotou potřebnou pro pájení
- pro připojování součástek v pouzdech „fine pitch“ a „ultra fine pitch“, kdy jsou mezery mezi sousedními vývody pouzdra velmi malé a při montáži pouzdra pájením by docházelo často ke vzájemnému propojení sousedních vývodů („bridging“)
- pro realizaci vodivých spojů na flexibilních substrátech

Vodivé lepení se např. používá při výrobě LCD zobrazovačů, kde je nutné realizovat vodivé připojení transparentních elektrod zobrazovače a vodiče, a to při teplotě, která nepoškodí příslušný kapalný krystal.

Další důležitou aplikací vhodnou pro použití vodivého lepení je miniaturizace elektronických součástek a jednotlivých bloků. V aplikacích, při kterých míra miniaturizace překračuje možnosti standardních postupů pájení, lze pro vytvoření vodivého spojení s výhodou použít technologii vodivého lepení. [17]

Vazební složka lepidla

Lepidla pro vodivé lepení se skládají ze dvou základních složek. První složka je vazební („binder“). Tato složka je izolační a tvoří prostředí, ve kterém jsou rozptýleny kovové vodivé části lepidla, tzv. plniva („filler“). Vazební složka je zpravidla na bázi epoxidových pryskyřic, ale jsou používány i jiné druhy pryskyřic, například polyamidové, akrylátové, silikonové nebo jiné. Tato složka zajišťuje vhodnou soudržnost vodivých částic lepidla a po vytvrzení určuje mechanické vlastnosti spoje, jako jsou pevnost, adheze, odolnost spoje proti korozi a další. [16]

Vodivostní složka lepidla

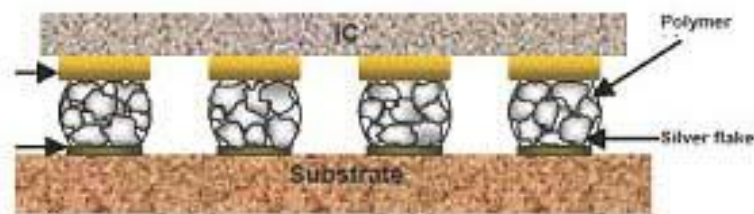
Vodivostní složka tvoří druhou část vodivého lepidla. Jedná se o plnivo, což jsou vodivé částice, které po vytvrzení zajistí vytvoření elektricky vodivého spoje. Tvarem, velikostí a množstvím vodivých částic v lepidle lze dosáhnout různých elektrických a mechanických vlastností spoje. Tuto složku lepidla nejčastěji tvoří částice stříbra (Ag), mědi (Cu), niklu (Ni) nebo palladia (Pd). Vodivé částice mohou mít různé tvary jako například kuličky, šupinky, tyčinky, trubičky. Ve speciálních případech mohou být tyto základní vodivé částice doplněny nanočásticemi vhodného tvaru, které zajistí vytvoření dodatečných vazeb mezi vodivými částicemi sintrováním. Tím klesne elektrický odpor spoje. [16]

3.1.1 Izotropní vodivá lepidla (ICA)

Základní rozdělení vodivých lepidel podle elektrických vlastností spoje je na izotropní vodivá lepidla (ICA - Isotropic Conductive Adhesives) a anizotropní vodivá lepidla (ACA - Anisotropic Conductive Adhesives).

Izotropní vodivá lepidla vykazují po jejich vytvrzení stejnou vodivost ve všech směrech tak, jak jsme zvyklí u běžného pájení. Tohoto efektu je dosaženo koncentrací vodivostní složky v lepidle, zpravidla v rozsahu 65 – 80 % (váhových) a tvarem vodivých částic. V tomto případě se užívá nejčastěji šupinek. Po vytvrzení lepidla je zajištěno vodivé

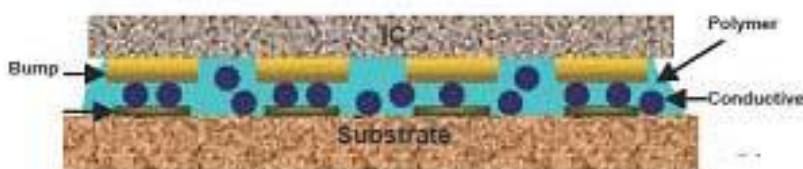
propojení vodivých částic ve všech směrech a spoj vykazuje všesměrovou vodivost. Vazební složku tvoří epoxidové, polyamidové nebo akrylátové pryskyřice.



Obr. 12: Detail struktury izotropního lepení [14]

3.1.2 Anizotropní vodivá lepidla (ACA)

Skupina anizotropních lepidel se po svém vytvrzení vyznačuje směrovou vodivostí. Elektrické spojení má elektrickou vodivost pouze ve směru osy „z“, tedy ve směru přechodu součástka - substrát. V ostatních směrech je spoj nevodivý. Koncentrace vodivých částic v lepidle je nízká, zpravidla 5 – 15 % (váhových). Částice plniva mají tvar kuliček o rozměrech několika mikrometrů. Vodivé spojení je realizováno tak, že nejprve je fólie z anizotropně vodivého lepidla vložena mezi spojované části, např. kontakt nebo vývod pouzdra elektronické součástky a připojovací plošku na desce plošného spoje. Poté při aplikaci zvýšené teploty a tlaku na připojovanou součástku, se kuličky v lepidle sevrou mezi vývod (kontakt) součástky a připojovací plošku na desce plošného spoje a lepidlo se vytvrdí. Tím je zajištěna vodivost pouze ve směru osy „z“, protože koncentrace kuliček není tak vysoká, aby se vzájemně dotýkaly a vytvořily tak vodivý spoj ve směru os „x“ a „y“ (viz obr. 13).



Obr. 13: Detail struktury anizotropního lepení [14]

3.1.3 Nanášení vodivých lepidel

Proces nanášení vodivých lepidel je podobný jako nanášení pájecí pasty. Vodivá lepidla jsou aplikována do oblastí požadovaných vodivých spojů. Poté jsou do těchto míst osazovány součástky. Vzhledem k tomu, že při vodivém lepení není použito tavidlo, je nutné dbát na čistotu a nízkou oxidaci spojovaných částí. Možné způsoby nanášení vodivých lepidel jsou:

- sítotiskem
- přes šablonu
- dispenzerem
- hroty

Nanášení lepidla sítotiskem

Sítotisk je jeden z možných způsobů nanášení vodivých lepidel. Stejně jako při nanášení pájecích past je lepidlo protlačováno přes otvory vhodně zamaskovaného síta. Nanášení vodivého lepidla na všechny požadované plochy substrátu se realizuje v jednom kroku. Proces je podobný jako nanášení pájecí pasty sítotiskem.

Nanášení lepidla přes šablonu

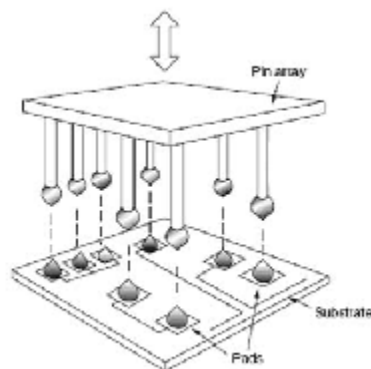
Touto metodou se lepidlo nanáší přes kovovou šablonu. Skrz otvory v šabloně se lepidlo protlačuje na požadovaná místa. Stejně jako v případě sítotisku se jedná o proces, který je realizovaný v jednom kroku, což z tohoto procesu činí velmi efektivní a rychlou metodu aplikace vodivého lepidla na substrát.

Nanášení lepidla dispenzerem

Aplikace vodivého lepidla dispenzerem se zajišťuje vytlačováním lepidla z dávkovače přes dutou jehlu. Tento způsob aplikace lepidla není tak rychlý jako tisk přes šablonu nebo sítotiskem, ale najde využití při výrobě prototypů výrobků nebo malých sérií o několika kusech.

Hrotem

Nanášení vodivého lepidla hrotem je založeno na smáčení hrotů osazených na nosné konstrukci v lepidle a následném přenesení lepidla na místo požadovaného spoje. Hroty jsou ponořeny do nádoby lepidlem, poté jsou hroty přemístěny na místo aplikace, kde je lepidlo ze špiček hrotů přeneseno na požadovaná místa (obr. 14).



Obr. 14: Nanášení vodivého lepidla na DPS hrotem [18]

3.1.4 Vytvrzování vodivých lepidel

Po aplikaci lepidla následuje proces vytvrzení. V průběhu tohoto procesu dochází k vytvoření mechanických a elektrických spojů požadovaných vlastností. U většiny jednosložkových lepidel se vytvrzování realizuje zvýšenou teplotou. Pro dosažení kvalitního vytvrzení je nezbytné dodržení parametrů požadovaných výrobcem lepidla. Kritické jsou zejména rozsahy teplot a časů vytvrzování. Obvyklé teploty pro vytvrzování jednosložkových vodivých lepidel se pohybují v rozsahu 100 až 180°C. Vytvrzovací doba se může pohybovat od 10 minut po 3 hodiny v závislosti na použitém lepidle a teplotě. Vytvrzování některých lepidel lze urychlit působením UV záření. Vzhledem k nižším teplotám použitých při vodivém lepení není lepená sestava tepelně namáhána tak, jak by byla při pájení. Vytvrzování dvousložkových lepidel je zajištěno přidáním tvrdidla do lepidla před jeho aplikací. Správné vytvrzení lepidla je zajištěno vytvrzovacím rozvrhem („curing schedule“) daným výrobcem lepidla. Vytvrzení je v některých případech možné i při normální teplotě, samozřejmě v delším čase než při zvýšené teplotě. Dvousložková lepidla mají výhodu v delší době skladování. Skladování lepidel je zpravidla možné za normální teploty.

4 Úvod do teorií FMEA a FTA

Metody FMEA - Analýza způsobů a důsledků poruch (Failure Mode and Effects Analysis) a FTA - Analýza stromu poruchových stavů (Fault Tree Analysis) jsou pokročilé analytické nástroje managementu jakosti používané, mimo jiné, i pro optimalizaci procesů. Tyto metody mají za úkol identifikaci všech možných potenciálních poruch, které mohou nastat a nalezení všech možných příčin těchto poruch. Tyto metody byly vyvinuty v druhé polovině minulého století jako nástroje pro identifikaci poruch dříve, než nastanou. Obě našly uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích od automobilového průmyslu, přes vojenské aplikace až po použití ve vesmírném programu. Rozšíření používání těchto nástrojů je způsobeno jejich univerzálností, efektivností a možností použití v široké oblasti řízení kvality a rizik. V mnoha průmyslových odvětvích se tyto metody staly standardem.

Tyto metody je možné použít pro vylepšení procesů v rané fázi jejich přípravy. Takto můžeme docílit výrazného snížení nákladů oproti pozdějším dodatečným opatřením. Identifikace možných závad ve stadiu přípravy procesu je vždy levnější, než dodatečná opatření implementovaná na již spuštěný proces. Na rozdíl od mnoha jiných nástrojů pro zlepšování kvality, FMEA a FTA nevyžadují obsáhlá statistická data, a přesto mohou přinášet významné úspory a zlepšení kvality. Metody slouží jako nástroj pro identifikaci možných vážných rizik. Jsou to preventivní metody používané pro odhalení rizik.

Podstatou metod je identifikace celého procesu, nalezení možných typů poruch a v případě FMEA i dopadů těchto poruch na vlastnosti jeho výstupu a omezení příčin a důsledků těchto poruch. Správná aplikace metod vyžaduje detailní znalost systémů z důvodu správné identifikace možných poruch a jejich způsobů.

4.1 FMEA - Analýza způsobů a důsledků poruch

4.1.1 Úvod do analýzy FMEA

FMEA je jednou z často používaných preventivních metod řízení jakosti. Tato analýza systematickým způsobem identifikuje poruchy, které mohou nastat a těmto poruchám přiřazuje jejich důsledky. Každý způsob poruchy a její důsledek má jinou závažnost. Tuto skutečnost vystihuje ukazatel kritičnosti, který každé poruše přiřadí hodnotu její závažnosti. Při využití Paretova principu, který vychází z teorie, kdy většina poruch je způsobena malým množstvím příčin, lze tímto způsobem v systému velmi efektivně identifikovat kritická místa a aplikací nápravných opatření v těchto místech eliminovat většinu možných poruch.

Ke každému způsobu poruchy se z ukazatelů závažnosti důsledku poruchy, pravděpodobnosti výskytu a možné detekce vypočte ukazatel kritičnosti poruchy. Tímto způsobem se určí závažnost způsobu poruchy pro určení priorit pro přijímání následných opatření pro eliminaci identifikovaných poruch.

Pro aplikaci metody FMEA jsou zapotřebí minimální náklady. Při správném zpracování tato metoda vykazuje vysokou úspěšnost, protože přímo identifikuje konkrétní místa v procesu a určuje jejich kritičnost. Na tyto místa je vhodné se zaměřit. Metoda má velký potenciál, protože umožňuje zvýšit spolehlivost produktů, jejich kvalitu a tím snížit výsledné náklady procesu. [4]

Metoda FMEA v několika dalších modifikacích:

PFMEA	Process FMEA	FMEA aplikovaná na proces
SFMEA	System FMEA	FMEA aplikovaná na systém
DFMEA	Design FMEA	FMEA aplikovaná na design
FMECA	FMEA Critical	FMEA kritických poruch

4.1.2 Definice základních pojmů FMEA

Pro účely FMEA analýzy jsou používány termíny:

objekt (item)	Část nebo součást zařízení, subsystém, funkční jednotka, zařízení nebo systém. Může se též jednat o hardware, software nebo proces.
porucha (failure)	Ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci.
poruchový stav (fault)	Stav objektu, kdy není schopen plnit požadovanou funkci.
důsledek poruchy (failure effect)	Následek způsobu poruchy pro provoz, funkci nebo stav objektu.
způsob poruchy (failure mode)	Způsob, jakým u objektu dochází k poruše.
kritičnost poruchy (failure criticality)	Kombinace závažnosti důsledků a četnosti výskytu nebo jiných atributů poruchy jako míra potřeby zaměřit se na ně a zmírnit je.
systém (system)	Soubor vzájemně souvisejících nebo vzájemně působících prvků.
závažnost poruchy (failure severity)	Významnost nebo stupeň důsledků způsobu poruchy na provoz objektu.

4.1.3 Postup při aplikaci analýzy FMEA

Analýza FMEA může být zahájena poté, co je celý systém vymezen tak, aby mohl být prezentován jako funkční blokový diagram, kde mohou být stanoveny technické parametry jednotlivých prvků. Pro správnou analýzu a pochopení systémů je mnohdy nezbytné zajistit součinnost týmu odborníků, kteří se systémem pracují, nebo budou FMEA aplikovat.

Tento tým musí zahrnovat členy, kteří mají zkušenosti a znalosti s jednotlivými částmi analyzovaného objektu a chápou vnitřní vztahy a možné interakce v analyzovaném systému. Tyto jejich znalosti budou klíčové pro identifikaci kritických míst. Pro sběr dat můžou být využity metody brainstormingu, diagramu příčin a následků nebo jiné metody vedoucí k identifikaci možných způsobů vzniku poruch.

Neangažovanost některých klíčových lidí, kteří mají informace o analyzovaném objektu, může znamenat chybějící zdroj důležitých informací. Další částí analýzy je sběr dat, která má za cíl identifikovat co možná nejvíce možných poruch, jejich způsobů a důsledků. Každou příčinu poruchy je třeba popsat. S rostoucí závažností poruchy je žádoucí detailnější popis její příčiny. Pro správnou aplikaci FMEA je důležité dodržet níže popsané kroky analýzy. [4]

- vymezení hranice systému pro analýzu
- definice všech způsobů poruch dané části systému
- volba způsobu poruchy k analýze
- stanovení možných bezprostředních a konečných důsledků
- stanovení závažnosti konečného důsledku
- zjištění potencionální příčiny daného způsobu poruchy
- odhad četnosti nebo pravděpodobnost výskytu způsobu poruchy za čas
- návrh metody pro zmírnění metody poruchy
- sumarizace důsledků poruch
- zpráva o analýze

4.1.4 Pracovní list FMEA

Pracovní list FMEA slouží k zaznamenání dat z analýzy ve formě tabulky. Do tohoto pracovního listu se zapisují všechny podrobnosti. Formát pracovního listu se může lišit podle požadavků na daný projekt. [4]

Základní části pracovního listu FMEA jsou:

- záhlaví pracovního listu
- objekt analyzovaný na pracovním listu
- revize, datum, jména pracovníků
- možná porucha
- možné příčiny poruchy
- možný důsledek poruchy
- doporučená opatření
- RPN

Záhlaví pracovního listu

Záhlaví pracovního listu identifikuje objekt a část objektu FMEA analýzy. Pro celý proces může existovat mnoho pracovních listů tak, že jednotlivé listy popisují dílčí části celého procesu. Je tedy vhodné zvolit označení pracovních listů tak, aby jednotlivé části procesů byli jednoznačně identifikovatelné.

Revize pracovního listu

Revize pracovního listu spolu s datem změny jednoznačně identifikují jednotlivé verze dokumentu v čase. Analýza FMEA může probíhat delší dobu, v některých případech i po celou dobu běhu projektu. Délka analýzy je ovlivněna zejména rozsahem analýzy a naplněním cílů této analýzy. V průběhu chodu analýzy vznikají změny a doplnění, které jsou zaznamenávány do pracovních listů. Po každé změně je nutné označit pracovní list jako následující verzi dokumentu. Toto opatření je nezbytné z důvodu zajištění identifikace jednotlivých verzí dokumentu v čase. Vždy je platná poslední verze dokumentu, která nahrazuje předchozí. Je však nutné předchozí verze dokumentu uchovávat. Dodržování značení revizí pracovních listů je nezbytné též z důvodu jednoznačného určení listu při komunikaci více stran.

Možné poruchy

Možné poruchy systému jsou základním prvkem této analýzy, od kterých se odvíjí další kroky FMEA analýzy. Identifikace možných poruch je jedním z prvních kroků, kdy je žádoucí identifikovat pokud možno všechny možné poruchy systému. V této fázi nezohledňujeme důležitost poruch a není žádoucí z jakéhokoliv důvodu některou poruchu z analýzy vypustit. Může nastat případ, kdy zdánlivě bezvýznamná porucha bude mít významný důsledek. Poté co dojde k identifikaci všech možných poruch, které mohou nastat, tyto poruchy zapíšeme do pracovního listu FMEA tak, že každý řádek pracovního listu bude popisovat jednu poruchu. Tímto způsobem budou do pracovního listu doplněny všechny možné poruchy systému.

Možné příčiny poruchy

Možné příčiny poruchy jsou události vedoucí k možné poruše. Tyto události předchází samotné poruše a při analýze FTA je důležité nalezení všech možných příčin poruchy. V mnoha případech je pro nalezení všech příčin poruchy nezbytná detailní znalost systému a schopnost vyhodnotit možnou poruchu v souvislosti s jednotlivými částmi systému. V této fázi analýzy jsou důležitým zdrojem informací lidé se znalostí a zkušenostmi se systémem. Této fázi analýzy je třeba přiřadit odpovídající důležitost, protože možné příčiny kritických poruch budou objektem opatření vyplývajících z výsledků analýzy.

Možné důsledky poruchy

Důsledky poruchy jsou možným vyústěním vzniklých poruch. Důsledek poruchy vyhodnocujeme na nejvyšší úrovni systému, kdy zvažíme všechny možnosti následků poruchy. V těchto případech je též nezbytná detailní znalost systému a vztahů v daném systému, abychom byli schopni určit důsledky jednotlivých poruch.

4.1.5 Kvantitativní analýza kritičnosti

RPN – Číslo priority rizika (Risk Priority Number)

Jedna z metod pro určení kritičnosti je výpočet čísla RPN (*Risk Priority Number*). Riziko je v tomto případě definováno ukazatelem závažnosti důsledku a odhadem pravděpodobností jeho výskytu v určeném časovém intervalu. V některých případech nejsou tyto ukazatele k dispozici a tak může být použit ukazatel potenciálního rizika R. Vztah pro ukazatel potenciálního rizika R se vyjadřuje jako:

$$R = S \times P \quad (4.1)$$

kde

S (*severity*) bezrozměrné číslo klasifikující závažnost důsledku poruchy

P (*probability*) bezrozměrné číslo vyjadřující pravděpodobnost výskytu poruchy

Pro výpočet RPN se používá pro jako parametr „detekce poruchy“ bezrozměrné číslo D. Toto číslo D bude použito pro výpočet čísla priority rizika RPN.

$$RPN = S \times O \times D \quad (4.2)$$

kde:

- O** (*occurrence*) je pravděpodobnost výskytu způsobu poruchy v daném čase
- D** (*detection*) klasifikuje detekce poruchy. Jedná se o odhad pravděpodobnosti detekce poruchy. Vyšší detekční číslo znamená menší pravděpodobnost detekce poruchy. Horší detekce znamená vyšší číslo RPN a tedy vyšší priorita při řešení daného způsobu poruchy

Číslo priority rizika se používá k určení priority při přijímání opatření pro snížení způsobů poruch. Poruchám s vyšším číslem RPN přiřadíme při přijímání opatření vyšší prioritu.

Hodnoty přiřazované ukazatelům, z nichž je kalkulováno RPN jsou popsány v následujících tabulkách 2, 3 a 4. [4]

Závažnost důsledků poruch

Závažnosti důsledků jednotlivých poruch přiřazujeme klasifikaci v intervalu od jedné do deseti. Klasifikační hodnota 1 říká, že závažnost vady je bezvýznamná, protože není žádný důsledek této vady. Se vzrůstající hodnotou klasifikace se zvyšuje závažnost vady, až do hodnoty 10, která značí ztrátu schopnosti objektu plnit základní funkci pro kterou je určen.

Klasifikace	Kritéria vady	Závažnost vady
1	Žádný zjištěný důsledek	Žádný
2	Vadu upozorují nároční zákazníci - méně než 25%	Velmi málo významná
3	Vadu upozoruje 50% zákazníků	Málo významná
4	Vadu upozoruje většina zákazníků - více než 70%	Velmi nízká
5	Zařízení je provozuschopné, ale zákazník je nespokojený	Nízká
6	Zařízení je provozuschopné, ale zákazník je velmi nespokojen	Střední
7	Zařízení je provozuschopné - snížená úroveň technických parametrů	Vysoká
8	Zařízení není provozuschopné - ztráta základní funkce.	Velmi vysoká
9	Velmi vysoká kvalifikace závažnosti - možné ovlivnění bezpečnosti	Nebezpečná s varováním
10	Velmi vysoká kvalifikace závažnosti - ohrožení na životě	Nebezpečná bez varování

Tab. 2: Závažnost důsledků poruch [4]

Hodnocení detekce způsobů poruch

Klasifikaci pravděpodobnosti detekce poruch se přiřazuje hodnota v intervalu od jedné do deseti. V tomto hodnocení též platí, že nejpříznivější klasifikace z pohledu detekce je hodnota 1. Při této hodnotě dochází k téměř jisté detekci potenciální příčiny poruchy. Můžeme tedy s jistotou říci, že při výskytu poruchy s tímto hodnocením ji budeme schopni detekovat. Na druhém konci hodnotící škály se nachází klasifikace s hodnotou 10, při které máme téměř jistotu, že k detekci závady nedojde. [4]

Klasifikace	Pravděpodobnost detekce při řízení návrhu	Detekce
1	Při řízení návrhu se bude téměř jistě detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	Téměř jistá
2	Je velmi vysoká naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	Velmi vysoká
3	Je vysoká naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	Vysoká
4	Je středně vysoká naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	Středně vysoká
5	Je střední naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	Střední
6	Je malá naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	Nízká
7	Je velmi malá naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	Velmi nízká
8	Je slabá naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	Slabá
9	Je velice slabá naděje, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	Velice slabá
10	Při řízení návrhu se nebude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy, nebo žádné řízení návrhu neexistuje	Absolutně nejistá

Tab. 3: Kritéria hodnocení detekce způsobů poruch [4]

Výskyt způsobu poruchy ve vztahu k četnosti a pravděpodobnosti výskytu

Četnost výskytu způsobu poruchy v systému je jeden z faktorů určujících výsledné riziko tohoto způsobu. Četnost jeho výskytu se vztahuje k určitému časovému období. V našem případě se bude jednat o způsoby poruch v procesu pájení a časové období bude omezeno životností objektu. V některých případech lze pravděpodobnost výskytu odhadnout, ale někdy je pro určení pravděpodobnosti potřeba zajistit statistická data výskytu dané poruchy. Pravděpodobnost výskytů na rozdíl od stupnice závažnosti není lineární. Na tuto skutečnost je nutné při použití výsledného čísla RPN pamatovat.

Výskyt způsobu poruchy	Klasifikace	Četnost	Pravděpodobnost
Velice slabý: Porucha je nepravděpodobná	1	$\leq 0,010$ na tisíc objektů	$\leq 1 \times 10^{-5}$
Nízký: Poměrně málo poruch	2	0,1 na tisíc objektů	1×10^{-4}
	3	0,5 na tisíc objektů	5×10^{-4}
Střední: Občasné poruchy	4	1 na tisíc objektů	1×10^{-3}
	5	2 na tisíc objektů	2×10^{-3}
	6	5 na tisíc objektů	5×10^{-3}
Vysoký: Opakující se poruchy	7	10 na tisíc objektů	1×10^{-2}
	8	20 na tisíc objektů	2×10^{-2}
Velmi vysoký: Porucha je téměř nevyhnutelná	9	50 na tisíc objektů	5×10^{-2}
	10	≥ 100 na tisíc objektů	$\geq 1 \times 10^{-1}$

Tab. 4: Výskyt způsobu poruch ve vztahu k četnosti a pravděpodobnosti výskytu [4]

Pro každou poruchu, její důsledek a příčinu navrhujeme opatření, které bude mít za následek zabránění vzniku poruchy. Do takto vyplněné tabulky doplníme k jednotlivým následkům poruch hodnoty od 1 do 10, kde 10 je nejzávažnější problém. Poté přiřadíme hodnoty od 1 do 10 příčinám poruch podle předpokládaného výskytu příčin poruch a stejným způsobem postupujeme při určení schopnosti detekce dané poruchy. [4]

4.1.6 Norma související s FMEA

ČSN EN 60812:2007 (01 0675) Techniky analýzy bezporuchovosti systémů – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)

Tato mezinárodní norma popisuje analýzu způsobů a důsledků poruch FMEA a FMECA. Norma předkládá možný způsob, jak mohou být tyto analýzy použity. Jsou zde definovány termíny FMEA analýzy, nutné předpoklady pro realizaci a způsoby použití. Též zde najdeme jednotlivé kroky potřebné pro realizaci analýzy. Tato norma poskytuje ucelený přehled všech potřebných informací pro přípravu a realizaci FMEA. Jsou zde také uvedeny příklady vývojových diagramů a pracovních listů FMEA. Norma poskytuje cenné informace o jednom ze základních nástrojů analýzy spolehlivosti. [4]

4.2 FTA - Analýza stromu poruchových stavů

4.2.1 Úvod do FTA

Analýza stromu poruchových stavů FTA (Fault Tree Analysis) je efektivní analytická metoda pro posuzování možných rizik složitých systému. FTA je založená na analýze vrcholové události (v tomto případě negativního nežádoucího jevu), kde identifikujeme možné faktory vedoucí k této vrcholové události.

Cílem analýzy je nalezení příčin a jejich kombinací vedoucích k vrcholové události (poruše) a následnému využití těchto informací pro zlepšení procesů a snížení pravděpodobnosti výskytu poruch v analyzovaných systémech. Jednotlivým událostem lze přiřadit pravděpodobnost jejich výskytu a takto lze identifikovat kritická místa v analyzovaném procesu.

Tímto způsobem lze stanovit, který ze způsobů poruch může největší měrou přispět k pravděpodobnosti poruchy systému. Lze též posoudit následek výskytu primární události na pravděpodobnost výskytu vrcholové události.

Oproti FMEA analýze se FTA liší způsobem postupu při analýze. Při FTA postupujeme od vrcholové události směrem k základním procesům, kdežto při FMEA analýze postupujeme opačným směrem. FTA tedy začíná od prvků na nejvyšší úrovni. [5]

4.2.2 Definice základních pojmů FTA

výstup (outcome)	Výstup je výsledek děje - jedná se o následek příčiny. Výstupem může být událost nebo stav.
vrcholová událost (top event)	Vrcholová událost je výstup kombinací všech vstupních událostí. Je umístěna navrcholu diagramu událostí. Někdy též „konečná událost (final event)“ nebo „vrcholový výstup (top outcome)“
hradlo (gate)	Značka používaná k definici vazby mezi výstupní událostí a vstupy. Značka hradla definuje typ logického vztahu mezi vstupními událostmi tak, aby došlo k výstupní události.

kritický řez (cut set)	Události, které při jejich současném výskytu způsobí vrcholovou událost.
min. kritický řez (minimal cut set)	Nejmenší množina událostí nutných k výskytu vrcholové události.
událost (event)	Výskyt podmínky nebo děje.
základní událost (basic event)	Událost nebo stav, který nelze dále rozvíjet.
primární událost (primary event)	Událost nacházející se na nejnižší úrovni diagramu.
mezilehlá událost (intermediate event)	Událost, které není ani vrcholovou, ani primární událostí.
výstup (outcome)	Výstup je výsledek děje - jedná se o následek příčiny. Výstupem může být událost nebo stav.
nerozvíjená událost (undeveloped event)	Událost bez vstupní události.
jednobod. porucha (single point failure)	Událost způsobující bez ohledu na ostatní události vrcholovou událost.
společná příčina (common cause)	Příčina výskytu několika událostí příčina výskytu několika jiných událostí.
opakovaná událost (repeated event)	Událost, která je vstupem pro několik událostí vyšší úrovně.

4.2.3 Strom poruchových stavů FTA

Grafickou reprezentací analýzy FTA je strom poruchových stavů. Jedná se o organizovanou strukturu podmínek a faktorů způsobujících nebo přispívajících k výskytu vrcholové události. Strom poruch je zobrazován jako diagram znázorňující logické vztahy mezi vrcholovou událostí a primární příčinou jejího vzniku. Strom poruch znázorní logiku vývoje poruchy v systému a odhalí vazby mezi prvky systému. Jednotlivé součásti stromu poruchových stavů jsou:

Hradla

Hradla definují logické vztahy mezi vstupními a výstupními událostmi. Hradla dále dělíme na statická a dynamická.

- **Statická** hradla jsou použita v případě, že výstup není závislý na pořadí výskytu na vstupu.
- **Dynamická** hradla používáme, když je výstup závislý na pořadí výskytu na vstupu.

Události

Události jsou na nejnižší úrovni vstupů ve stromu poruchových stavů. Do analýzy je nutné zahrnout všechny možné události včetně vlivů prostředí a ostatní podmínky namáhání, které mohou na objekt působit. Jestliže jedna událost může způsobit více poruchových stavů, pak tuto událost zaneseme do stromu poruch na několika místech.

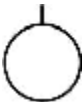











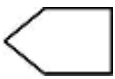
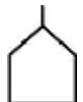
Ostatní

Ostatní grafické součásti grafické reprezentace FTA jsou:

- spojovací čáry
- popisy mezilehlých událostí
- značky transferu dovnitř a ven
- značky primárních událostí

Do stromu poruch by měly být zahrnuty všechny události, které mohou nastat. Strom poruch vytváříme ve svislém tvaru shora směrem dolů, nebo ve vodorovném tvaru z levé strany na pravou. Začneme vymezením vrcholové nežádoucí události. Jedná se o hlavní bod celé analýzy. Poté deduktivní metodou strom poruch rozvíjíme. Vztahy mezi událostmi jsou znázorněny pomocí hradel. Jednotlivé prvky stromu poruch mezi sebou propojují spojovací čáry.

4.2.4 Používané značky pro FTA

Značka	Název	Popis
	Základní událost	Událost na nejnižší úrovni, po kterou jsou k dispozici pravděpodobnosti výskytu nebo informace o bezporuchovosti.
	Podmínková událost	Událost, která je podmínkou výskytu další události, když obě musejí nastat, aby nastal výstup.
	Neaktivní událost	Primární událost, která reprezentuje neaktivní poruchu.
	Nerozvíjená událost	Primární událost, která reprezentuje část systému, která doposud nebyla rozvíjena.
	Transfer	Hradlo naznačující, že je tato část systému rozvíjena v jiné části nebo na jiné straně diagramu.
	Logický součet OR	Výstupní událost nastane, jestliže nastane jakákoliv ze vstupních událostí.
	Majoritní hradlo	Výstupní událost nastane, jestliže nastane m nebo více vstupních událostí z celkového počtu n vstupních událostí.
	Nonekvivalence EXCLUSIVE OR	Výstupní událost nastane, jestliže nastane jedna, ale ne jiná událost.
	Logický součin AND	Výstupní událost nastane pouze tehdy, jestliže nastanou všechny vstupní události.
	Prioritní logický součin PAND	Výstupní událost nastane pouze tehdy, jestliže nastanou vstupní události v pořadí zleva doprava.
	Blokování INHIBIT	Výstupní události nastanou pouze tehdy, jestliže nastanou obě vstupní události, z nichž jedna je podmínková.
	Negace NOT	Výstupní událost nastane pouze tehdy, jestliže nenastane vstupní událost.
	Sekvenční posloupnost SEQ	Výstupní událost nastane pouze tehdy, jestliže všechny vstupní události nastanou v pořadí zleva doprava. Totožné hradlo s PAND, jestliže není počet vstupů hradla omezen na 2.
	Přepínací událost	Událost, která se jistě stala nebo stane.

4.2.5 Postup při FTA

Realizaci FTA analýzy zahájíme, stejně jako u FMEA, vymezením jejího rozsahu. Po vymezení rozsahu se seznámíme se systémem. Zde je nutná detailní znalost jednotlivých částí systému. Na základě těchto znalostí budeme hledat možné způsoby poruch a případná nedostatečná znalost systému nám neumožní nalézt všechny možné způsoby poruch. Je též důležité se seznámit s vazbami a souvislostmi mezi jednotlivými bloky systému, kde může docházet k poruchám, které je nutné identifikovat a zaznamenat do stromu poruch.

Po detailním seznámení se se systémem definujeme vrcholovou událost. Tato událost bude nežádoucí stav, pro který budeme hledat možné způsoby poruch. Oproti FMEA analýze budeme tedy postupovat od vrcholové události, přes mezilehlé události, až po primární události, které znamenají prvotní příčinu poruchy.

Pro vytvoření stromu poruch používáme definované značky. Hlavní skupiny značek tvoří „události“ a „hradla“. Značky hradel nám definují vztahy mezi událostmi. Hradlo OR reprezentuje logický součet. Toto hradlo reprezentuje vztah, kdy v případě jakékoliv poruchy na vstupu hradla nastane porucha na výstupu. Hradlo OR tedy reprezentuje sériový systém. Hradlo AND reprezentuje mezi událostmi logický součin. Při tomto vztahu porucha nastane v případě, jestliže nastanou všechny vstupní události. Hradlo AND tedy reprezentuje systém paralelní zálohy. Další stavy je možné vyjádřit pomocí hradel popsaných výše. [5]

Kroky při aplikaci FTA analýzy

- vymezení rozsahu analýzy
- seznámení se systémem
- definice vrcholové události
- vytvoření stromu poruchových stavů
- analýza logiky stromu poruchových stavů
- zpráva o analýze
- posouzení možnosti zlepšení bezporuchovosti

4.2.6 Kvalitativní analýza FTA

Kvalitativní analýza stromu poruch má za cíl nalezení všech možných kombinací faktorů, podmínek a poruch prvků systému vedoucích k vrcholové události.

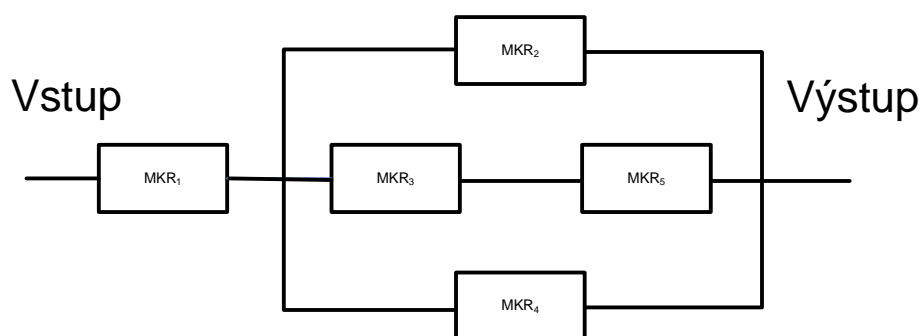
Kritické řezy stromu poruchových stavů

Kritické řezy jsou konečná množina řezů tvořená množinou základních dále nerozvíjených událostí, které v případě, že nastanou současně, vedou k vrcholové události.

Minimální kritické řezy stromu poruchových stavů

Minimální kritické řezy, označovány jako MKR, tvoří konečné množiny elementárních událostí, které jsou kritickým řezem, ale zároveň žádná jejich vlastní podmnožina není kritickým řezem. Tuto metodu nelze použít v případě, že vrcholová událost je časově závislá, nebo je závislá na posloupnosti událostí. Náročnost metody roste s počtem elementárních událostí ve stromu poruch.

Jestliže známe všechny minimální kritické řezy, můžeme logickou strukturu stromu poruchových stavů vyjádřit pomocí sérioparalelního blokového diagramu zobrazujícího logiku poruch systému tak, že každá větev diagramu je jeden minimální kritický řez. [19]



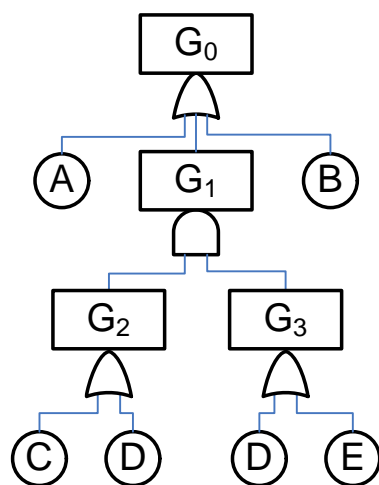
Obr. 15: Množina všech minimálních kritických řezů

Algoritmus nalezení kritických řezů

Důležitým požadavkem řešení stromu poruch je nalezení všech minimálních kritických řezů. Po splnění tohoto požadavku je možné transformovat logiku všech variant poruch systému na jednoduchou sérioparalelní logiku, kterou lze řešit výpočetními postupy.

Jednoduchou metodou pro určení množiny kritických řezů je Booleovská redukce založená na popisu logických vazeb stromu poruch. Metodu lze použít i v případě, že se stejná událost vyskytuje na více místech ve stromu poruch. Nelze jí však použít v případě závislosti vrcholové události na posloupnosti nebo časování jevů.

Touto metodou vyjádříme logiku vrcholové události jako kombinaci bezprostředních událostí způsobujících vrcholovou událost. V dalším kroku vyjádříme logiku vzniku událostí na nižších úrovních stejným způsobem. Takto postupujeme, dokud není vrcholová událost vyjádřena kombinací všech elementárních jevů. [19]



Obr. 16: FTA strom poruch

Pro vyjádření logiky vrcholové události postupujeme následovně. Máme strom poruchových stavů (viz. obr. 16). Vrcholovou událost G_0 vyjádříme jako logickou kombinaci událostí A, B a G_1 takto:

$$G_0 = A + G_1 + B \quad (4.3)$$

Poté dosadíme za událost G_1 logický výraz vyjadřující tuto událost jako kombinaci jeho příčin. Takto postupujeme, dokud nevyjádříme všechny kombinace elementárních jevů stromu poruch tak, že bude logický výraz tvořen pouze elementárními jevy.

$$G_0 = A + (G_2 \cdot G_3) + B \quad (4.4)$$

$$G_0 = A + ((C + D) \cdot (D + E)) + B \quad (4.5)$$

Poté můžeme přistoupit ke zjednodušení logického výrazu. Jelikož platí, že:

$$(C + D) \cdot (D + E) = C \cdot D + D \cdot E = D \quad (4.6)$$

Zjednodušíme vztah na:

$$G_0 = A + B + D \quad (4.7)$$

Našli jsme tři minimální kritické řezy:

$$\sum \text{MKR} = \{A\}, \{B\}, \{D\} \quad (4.8)$$

Výše popsaným postupem jsme při menším počtu elementárních jevů schopni určit všechny minimální kritické řezy. Řádem řezu nazýváme počet elementárních jevů v MKR. V případě velkého počtu elementárních jevů je tento postup hůře zvládnutelný a pro výpočet je výhodné použít některý z výpočetních programů k tomu určených. [19]

Hodnocení závažnosti minimálních kritických řezů

Kvalitativně můžeme posoudit strom poruch na základě rozboru minimálních kritických řezů podle různých kritérií závažnosti. Důležitým kritériem závažnosti je řád řezu. Minimální kritické řezy nižších řádů jsou zpravidla kritičtější, než řezy vyšších řádů. V případě minimálního kritického řezu prvního řádu nastává vrcholová událost již v okamžiku výskytu jednoho elementárního jevu. Vrcholová událost v případě MKR vyšších řádů nastává tehdy, jestliže nastanou všechny jevy řezu současně. [19]

4.2.7 Kvantitativní analýza FTA

V případě znalosti parametrů spolehlivosti elementárních prvků můžeme vytvořit kvantitativní analýzu stromu poruchových stavů. Tento model může zahrnovat celou řadu ukazatelů majících vliv na vrcholovou událost. [19]

Metoda přímého výpočtu

Metoda přímého výpočtu je založena na výpočtu pravděpodobnosti vzniku jevu na hradle $P(G)$, které definuje vztahy mezi elementárními jevy A_i na vstupu hradla. Tato metoda lze použít pouze pro stromy poruch, ve kterých se nachází každý elementární jev pouze jednou.

Pro hradlo OR je pravděpodobnost jevu dána vztahem:

$$P(G) = 1 - \prod_{i=1}^{i=s} [1 - P(A_i)] \quad (4.9)$$

Pro hradlo NAND vypočteme pravděpodobnost jevu:

$$P(G) = \prod_{i=1}^{i=s} P(A_i) \quad (4.10)$$

Aplikací těchto výpočtů určíme pravděpodobnosti všech neelementárních jevů. Při výpočtu postupujeme od nejnižší úrovně. Postupným výpočtem určíme pravděpodobnosti všech neelementárních jevů až do vrcholové události. [19]

Metoda minimálních kritických řezů

Metoda vychází z požadavku nalezení množiny všech kritických řezů. Strom transformujeme na sériově paralelní blokový diagram, kde každá větev bude jeden kritický řez. V případě, že se v blokovém diagramu nachází každý elementární jev jen jednou, můžeme použít metodu dekompozice a dále řešíme metodou přímého výpočtu. [19]

4.2.8 Norma související s FTA

Analýza stromu poruchových stavů (FTA) je popsána mezinárodní normou „ČSN EN 61025 (010676) *Analýza stromu poruchových stavů (FTA)*“.

Tato norma poskytuje ucelený přehled jakým způsobem postupovat při FTA analýze. Norma je aplikovatelná na široké spektrum činností od analýzy bezpečnosti systémů, např. dopravních systémů, elektráren až po jakékoliv jiné systémy, kde je nutné vyhodnocení bezpečnosti a spolehlivosti jejich provozu. Norma popisuje kvalitativní a kvantitativní přístup k FTA. Je zde detailně popsáno jak postupovat při jednotlivých krocích FTA od vymezení principů a identifikace událostí a způsobů poruch přes popis tvorby FTA diagramu a jejich grafických značek až po závěrečnou zprávu. [5]

5 FMEA a FTA procesu pájení přetavením

5.1 FMEA pro proces pájení přetavením

V současné době je pájení přetavením jednou z často používaných metod pájení. Při pájení přetavením je ve většině případů používána bezolovnatá pájka. Pájení bezolovnatou pájkou je z technologického hlediska náročnější a citlivější na optimalizaci procesu oproti pájení pájkou s obsahem olova. Pro optimální nastavení procesu pájení je nezbytná detailní znalost celého procesu pájení. Neméně důležitá je znalost strojního vybavení použitého při pájení a jeho správné nastavení. Dalšími faktory vstupujícími do procesu pájení je lidský faktor, použité materiály a vliv prostředí.

5.1.1 Vymezení hranice systému pro FMEA analýzu

Při FMEA analýze budeme postupovat podle výše popsaných kroků. Analýzu zahájíme vymezením hranice systému. V našem případě budeme analyzovat proces výroby pájeného spoje od nanesení pájecí pasty přes osazení substrátu součástkami až

po zapájení komponent přetavením. V těchto třech základních krocích technologického postupu definujeme všechny možné způsoby poruch.

5.1.2 Způsoby poruch procesu pájení přetavením

Vymezením hranic systému definujeme, pro které části procesu budeme hledat způsoby možných poruch. Pro nalezení možných poruch je nezbytná důkladná znalost systému. Pro nalezení možných způsobů poruch použijeme metodu brainstormingu, při které budeme analyzovat jednotlivé kroky procesu a vyhledávat možné způsoby poruch. Několikanásobný průchod celým procesem nám zajistí odhalení maximálního možného množství způsobů poruch systému. Všechny nalezené způsoby poruch zaznamenejme do pracovního listu.

5.1.3 Pracovní list FMEA analýzy pro pájení přetavením

V průběhu analýzy možných poruch všechny identifikované způsoby poruch zaznamenejme do pracovního listu FMEA, který je součástí této práce (viz. příloha č.2). Je důležité identifikovat co nejpřesněji všechny možné způsoby poruch a najít poruchy, které jsou způsobeny více faktory. Takové poruchy je někdy obtížné najít a podrobná analýza vyžaduje velmi dobrou znalost analyzovaných procesů.

Po nalezení možných způsobů poruch budeme hledat možné důsledky těchto poruch. Po detailním vyhodnocení poruch je možné, že najdeme více možných důsledků způsobených jednou poruchou. Tato skutečnost je způsobena kombinací dalších možných faktorů, které přispívají k různým důsledkům jedné poruchy. Ke každému způsobu poruchy přiřadíme hodnotící kritérium v rozsahu 1 - 10, které definuje míru významu konkrétní poruchy, kdy 1 je nejméně závažná chyba a 10 nejzávažnější chyba.

Možné příčiny, které mohou předcházet každé jednotlivé poruše, jsou zdrojem důležitých informací pro nalezení vhodných opatření pro eliminaci dané poruchy. Vyhodnocením možné chyby a její příčiny lze přiřadit poruše hodnotící kritérium definující schopnost detekce poruchy. Tomuto kritériu je přiřazena hodnota v rozsahu od 1 – 10, kdy větší hodnota znamená horší možnost detekce. Hodnota ze stejného rozsahu je přidělena též parametru množství výskytu poruchy.

Z hodnot významu poruchy, schopnosti její detekce a množství výskytu je kalkulováno RPN číslo, které udává míru rizika dané a prioritu při řešení poruchy.

Pro tyto nalezené poruchy budeme hledat způsoby, jak jim předejít. Další část pracovního listu je určena pro zaznamenání možných opatření určených pro eliminaci vzniku poruchy. Pro každý způsob poruchy musí být stanovena odpovědná osoba, která do určitého data zajistí realizaci navrhovaných opatření. Poslední část pracovního listu je specifikace skutečně realizovaných opatření a jejich hodnocení.

5.2 FTA pro proces pájení přetavením

5.2.1 Vymezení hranice systému pro analýzu

Pro FTA analýzu pájení přetavením byla definována vrcholová událost "závažná vada pájeného spoje". Pro tuto událost budeme hledat možné způsoby poruch, které se mohou vyskytnout při procesu pájení. Rozsah analýzy bude od nanesení pájecí pasty, přes osazení součástek až po pájení přetavením a chlazení pájené sestavy.

5.2.2 Strom poruch pro proces pájení přetavením

Při rozvíjení stromu poruch budeme postupovat od vrcholové události přes mezilehlé až k primárním událostem. Každý vstup vrcholové události bude rozvíjen samostatně a rozvoj větve bude ukončen v okamžiku dosažení primární události. Stejným způsobem budeme postupovat v případě mezilehlých událostí, dokud nenalezneme všechny možné způsoby poruch, nebo nedosáhneme hranice rozsahu analýzy. S výhodou využijeme informace z předchozí FMEA analýzy.

Strom poruchových stavů (viz příloha č.3) byl sestaven a byly nalezeny primární události. Poté co byl sestaven strom poruchových stavů, přistoupíme k nalezení minimálních kritických řezů. Tyto MKR určíme metodou analýzy stromu poruchových stavů. Poté z nalezených MKR sestavíme hodnocení závažnosti MKR. Toto hodnocení závažnosti MKR určuje priority při přijímání opatření zabraňujících vzniku primárních událostí.

5.2.3 Minimální kritické řezy, závažnost MKR

Pro nalezení úplné množiny minimálních kritických řezů použijeme metodu Booleovské redukce. Tato metoda je použitelná i pro stromy poruch, kde se vyskytuje jedna událost ve více větvích. Zároveň v tomto stromu poruch není časová závislost, nebo závislost na posloupnosti jevů.

Nejprve vyjádříme logiku vrcholové události jako kombinaci mezilehlých a primárních událostí. V našem případě máme vrcholovou událost označenou jako G_0 . Pro vrcholovou událost je kombinace vstupních událostí vyjádřena vztahem:

$$G_0 = G_1 + G_2 + G_3 \quad (5.1)$$

Za jevy G_1 , G_2 a G_3 dosadíme logické výrazy vyjadřující tyto jevy logickou kombinací jejich příčin. Tímto budeme vztah rozvíjet, dokud ve všech větvích nedosáhneme primárních událostí.

$$G_0 = (G_4 + A) + (B + G_5 + G_6 + G_7 + G_8) + (B + C + D) \quad (5.2)$$

Rozvinuté vztahy na dalších úrovních jsou:

$$G_0 = ((E + F) + A) + (B + (H + E) + ((M + N) \cdot (O + J)) + (I + J) + (K + L)) + (B + C + D) \quad (5.3)$$

$$G_0 = E + F + A + B + H + E + (M \cdot O) + (M \cdot J) + (N \cdot O) + (N \cdot J) + I + J + K + L + B + C + D \quad (5.4)$$

Tímto způsobem jsme dosáhli vrcholových událostí ve všech větvích stromu poruch. Nyní můžeme přistoupit k úpravě výrazu tak, aby se jednalo o prosté sjednocení jevů.

Jelikož platí:

$$((M \cdot J) + (N \cdot J)) + J = J \quad (5.5)$$

Výraz dále zjednodušíme na:

$$G_0 = A + B + C + D + E + F + H + I + J + K + L + (M \cdot O) + (N \cdot O) \quad (5.6)$$

Úpravou vztahu dostaneme množinu minimálních kritických řezů:

$$\sum \text{MKR} = \{A\}, \{B\}, \{C\}, \{D\}, \{E\}, \{F\}, \{H\}, \{I\}, \{J\}, \{K\}, \{L\}, \{M \cdot O\}, \{N \cdot O\} \quad (5.7)$$

Podle kritéria závažnosti minimálních kritických řezů můžeme považovat MKR průniků jevů $\{M \cdot O\}$ a $\{N \cdot O\}$ za méně závažné. Jedná se o průniky jevů, kde platí, že pravděpodobnost průniku jevů je dána součinem pravděpodobností jevů. Pro výskyt jevů vyšších řádů je nutý výskyt těchto jevů současně. U ostatních jevů se může vrcholová událost vyskytnout již tehdy, jestliže nastane jakýkoliv z elementárních jevů prvního řádu.

6 FMEA a FTA procesu izotropního vodivého lepení

6.1 FMEA pro proces vodivého izotropního lepení

Hlavním cílem vodivého izotropního lepení stejně jako pájení je vytvoření vodivého spoje a zajištění požadovaných mechanických vlastností spoje. Tímto zdánlivá podobnost těchto dvou technologií vodivého spojování končí. Z technologického hlediska se jedná o rozdílné procesy výroby i principu vzniku vodivého spoje a to jak z pohledu technologických postupů. Tak z pohledu použitých materiálů. Pro úspěšnou implementaci FMEA je stejně jako u všech procesů, kde existuje požadavek na implementaci FMEA, nutná detailní znalost procesů, které budeme analyzovat. Technologie vodivého lepení je v rozsahu potřebném pro FMEA analýzu popsána (viz. kapitola 3). Z těchto informací bude při analýze čerpáno a zároveň bude použita metoda brainstormingu pro nalezení dalších možných způsobů poruch.

6.1.1 Vymezení hranice systému pro FMEA analýzu

Hranice pro FMEA analýzu jsme stanovili od procesu nanesení lepidla, přes osazení součástek až po vytvrzení lepidla. V tomto rozsahu se budeme snažit identifikovat možné poruchy, které mohou v těchto procesech vzniknout. Budeme se snažit najít poruchy, které mohou způsobit vážnou závadu lepeného spoje nebo zařízení a takové, které vzniknou v přímém důsledku procesu lepení, nebo které bezprostředně s tímto procesem souvisejí.

U identifikovaných poruch najdeme možné příčiny jejich vzniku. Nalezené příčiny poruch budou dalším zdrojem informací pro návrh opatření vedoucích k omezení jejich výskytu. Hodnoty ukazatelů významu závady, pravděpodobnosti detekce poruchy a pravděpodobnosti výskytu poruchy budou přiřazeny ke každé poruše. Tyto tři ukazatele budou zaznamenány do pracovního FMEA protokolu a budou použity pro výpočet RPN čísla určujícího riziko této poruchy.

6.1.2 Způsoby poruch procesu vodivého izotropního lepení

Vymezením hranic pro analýzu stromu poruch vodivého izotropního lepení definujeme rozsah procesu, pro který budeme analýzu zpracovávat. Metodou brainstormingu se budeme snažit nalézt všechny možné způsoby poruch v procesu. Několikanásobný průchod celým procesem nám zajistí odhalení maximálního možného množství způsobů poruch systému. Všechny nalezené způsoby poruch zaznamenáme do pracovního listu.

6.1.3 Pracovní list FMEA pro proces izotropního vodivého lepení

Pracovní list FMEA používáme pro zaznamenání všech nalezených možných způsobů poruch. Pro tyto poruchy najdeme jejich příčiny a důsledky, tak jak bylo posáno výše. Doplníme hodnotící ukazatele „význam poruchy“, „detekce poruchy“ a „četnost výskytu“. Z těchto tří ukazatelů vypočteme RPN číslo, které určuje riziko poruchy. Kompletní FMEA pracovní protokol procesu izotropního vodivého lepení je přiložen jako příloha č. 4 této práce.

6.2 FTA pro proces vodivého izotropního vodivého lepení

6.2.1 Vymezení hranice systému pro analýzu

Vymezení hranice systému pro FTA analýzu vodivého anizotropního lepení jsme zvolili od nanesení lepidla, přes osazení součástek až po vytvrzení lepidla. Zahrnuje tak celý proces vodivého lepení.

6.2.2 Strom poruch pro proces izotropního vodivého lepení

Jako vrcholovou událost stromu poruch definujeme událost „Závažná závada lepeného spoje“. Tato událost má za následek nefunkční spoj, nebo spoj vykazující zhoršené elektrické, nebo mechanické vlastnosti mající vliv na funkčnost zařízení. Strom poruch rozvíjíme od vrcholové události, dokud nedosáhneme primární události. Takto postupujeme ve všech větvích stromu. Strom poruch pro proces izotropního vodivého lepení je přiložen jako příloha č. 5 této práce.

6.2.3 Minimální kritické řezy, závažnost MKR

Pro nalezení úplné množiny minimálních kritických řezů budeme postupovat obdobně jako v případě procesu pájení. Nejprve jednotlivým prvkům stromu poruch přiřadíme identifikátory. Písmenem G_i a jeho dolním indexem označíme jednotlivá hradla. Písmeny od A do Z mimo písmene G, které je vyhrazeno pro hradla, označíme primární události. Strom poruch je v této podobě připraven pro nalezení všech minimálních kritických řezů. Pro zjednodušení použijeme metodu Booleovské redukce. Postupnou úpravou vztahů získáme množinu minimálních kritických řezů:

$$G_0 = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 \quad (6.1)$$

po úpravě

$$G_0 = (A + B) + (G_5 + G_6) + (C + D + G_7) + (E + F + H) \quad (6.2)$$

$$G_0 = (A + B) + ((I + J) + (K \cdot (N + O))) + (C + D + (L + M)) + (E + F + H) \quad (6.3)$$

Množina minimálních kritických řezů je:

$$\sum \text{MKR} = \{A\}, \{B\}, \{C\}, \{D\}, \{E\}, \{F\}, \{H\}, \{I\}, \{J\}, \{L\}, \{M\}, \{K \cdot N\}, \{K \cdot O\} \quad (6.3)$$

Kritérium závažnosti minimálních kritických řezů nám definuje řezy, které jsou průnikem více jevů. Tyto jevy jsou méně kritické a z pohledu kritičnosti se nejprve zaměříme na jevy, které jsou samy o sobě příčinou vzniku vrcholové události.

7 Přínos FMEA a FTA pájení a vodivého lepení

7.1 Přínos FMEA v systému řízení kvality

FMEA analýza se ukázala jako účinná metoda pro analýzu spolehlivosti systému. Na základě výsledků této analýzy lze přijmout opatření pro omezení vzniku možných poruch, které mohou způsobit havárii systému. Aplikovat FMEA analýzu je velmi efektivní před spuštěním výroby. Tímto krokem zajistíme identifikaci možných nedostaků a můžeme přijmout patřičná opatření již ve fázi návrhu. Vyhnete se tak situaci, kdy budeme nedostatky řešit až po spuštění výroby. Správné a kompletní zpracování FMEA může být velmi pracnou a časově náročnou činností. U rozsáhlých systémů s mnoha funkcemi a možnými způsoby poruch je nutná určitá zkušenost s implementací FMEA, protože je nezbytné vyhodnotit mnoho spolu souvisejících informací a zároveň je nezbytná dobrá znalost analyzovaného systému. V mnoha případech bude nutná angažovanost týmu specialistů na daný proces. Výsledným efektem FMEA bude detailně zmapovaný proces a přesně identifikované možné

způsoby vzniku poruch. Bude se jednat o živý dokument, který je vhodné na základě nově získaných informací doplňovat a aktualizovat. FMEA nám též poskytne vyhodnocení možných rizik a nabídne návrhy na realizaci opatření vedoucích k odstranění možných neshod. Na základě této analýzy lze identifikovat a eliminovat až 90% možných neshod. Náklady na zvedení FMEA jsou v porovnání s případnými náklady vynaloženými na řešení neshod vzniklých při výrobě zanedbatelné. Na účinnost metody FMEA ukazuje skutečnost implementace této metody do metodiky řízení kvality předních světových výrobců automobilů a u mnoha dalších významných společností.

7.2 Přínos FTA v systému řízení kvality

Použitím analytické metody FTA, kterou jsme aplikovali na proces pájení a vodivého lepení jsme v prvním kroku detailně poznali analyzovaný systém. Samotný rozbor analyzovaného systému přináší důležité informace, které jsou nezbytné pro správnou implementaci FTA. Poznali jsme vztahy mezi různými částmi procesu a vytvořili tak podmínky pro spuštění další části analýzy. Poté jsme poznaly analyzovaný systém, určili vrcholovou událost stromu poruch a vydefinovali hranice analýzy. Tímto krokem zajistili, že analýza bude obsahovat pouze informace související s vrcholovou událostí a v rozsahu určených hranic. Při rozvíjení systému jsme definovali možné způsoby poruch, kterými může vrcholová událost vzniknout. Rozvíjením stromu poruch jsme získali velmi užitečné informace o chování systému, což nám popisuje systém z pohledu možných způsobů dosažení vrcholových událostí. V této části je též důležité najít možné kombinace událostí, které způsobují vrcholovou událost pouze v případě jejich současného výskytu. Po sestavení stromu poruch jsme definovali minimální kritické řezy, které nám specifikují všechny nejkratší možné způsoby výskytu vrcholové události. Po nalezení minimálních kritických řezů jsme schopni tyto řezy posoudit z pohledu pravděpodobnosti jejich výskytu. MKR vyšších řádů mají menší pravděpodobnost výskytu než MKR prvního řádu, kdy již výskyt primární události způsobí výskyt vrcholové události. Přínos FTA pro řízení kvality je především v identifikaci možných způsobů vzniku vrcholových událostí a těmto způsobům umíme přiřadit pravděpodobnost jejich výskytu.

8 Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se s technologickými procesy pájení a vodivého lepení v elektronice a na tyto procesy aplikovat FMEA a FTA analýzy. Procesy vodivého spojování byly popsány v rozsahu vymezeném hranicemi pro analýzu a umožňující aplikaci analytických nástrojů FMEA a FTA. Znalosti získané při seznámení se s procesy pájení a vodivého lepení posloužily jako podklad pro zpracování FMEA a FTA.

V další části jsou popsány dvě analytické metody FMEA a FTA, které jsou silnými nástroji systému řízení jakosti. FMEA je metoda, díky které lze identifikovat místa možných závad ještě před spuštěním sériové výroby. FTA je druhá popisovaná metoda, pomocí které jsme vyhodnotili spolehlivost systému a určili pravděpodobné způsoby jeho selhání.

Obě tyto analýzy byly aplikovány na procesy pájení a vodivého lepení. Aplikace těchto analýz přinesly důležité informace o možnostech vzniku chyb v procesech a identifikovaly místa možných selhání systému. V některých případech analýzy odhalily vztahy, které by jinak mohly zůstat skryty. Implementace opatření vyplývajících z těchto analýz přináší úsporu času a nákladů vlivem snížení chyb ve výrobních procesech a zvýšení kvality výsledných produktů.

Nemusí se přitom jednat jenom o odstranění příčin poruch, ale je důležité i zlepšit detekci závad. Závažnost poruch neovlivníme, jsou dány podstatou poruch. Můžeme pouze omezit výskyt nebo zlepšit detekci poruch.

Analýzy FMEA a FTA by se měli stát důležitými nástroji pro řízení kvality výroby nejen velkých společností. Náklady na implementaci těchto nástrojů se ve většině případů brzy vrátí v podobě úspor.

Úspěšná implementace FMEA a FTA vyžaduje dobrou znalost těchto metod a velmi užitečné jsou praktické zkušenosti získané při implementaci předchozích aplikací. Opakovanou aplikací metod FMEA a FTA na jeden proces získáme další detailnější informace, které opět budou základem pro zlepšení procesu. Metody FMEA a FTA jsou bezpochyby velmi užitečnými nástroji pro zlepšení a zkvalitnění procesů pájení a vodivého lepení v elektronice.

9 Použitá literatura a ostatní informační zdroje

- [1] DURAJ, A., MACH, P.: „*Failure mode and effect analysis of a process of reflow lead-free soldering*“, Proc. International Seminar on Electronics Technology – Reliability and Life-time prediction, Budapest, Hungary, 2008, pp. 167-171
- [2] MC DERMONT, R.E., MIKULAK, R.J., BEAUREGARD, M.R., „*FMEA*“, CRC Press, 2009
- [3] CLIFTON, A., ERICSSON II, „*Fault Tree Analysis Primer*“, Create Space Inc., 2011
- [4] ČSN EN 60812 (010675) „*Techniky analýzy bezporuchovosti systémů - Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)*“, ICS 03.120.01; 0,120.99, Listopad 2007
- [5] ČSN EN 61025 (010676) „*Analýza stromu poruchových stavů (FTA)*“, ICS 03.120.01; 03,120.30; 21.020, Leden 2007
- [6] ABEL M., CIMBUREK, V.: „*Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*“, ABE.TEC s.r.o., 2005, ISBN 80-903597-0-1
- [7] SZENDIUCH, I.: „*Surface Mount Technology*“, [online] [cit. 25. března 2016]. Dostupné na: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-08A-Mont%C3%A1%C5%BEEn%C3%AD%20technologie%28Bc%29.pdf>
- [8] dps-az.cz, „*Nanášení pájecí pasty*“, [online] [cit. 25. března 2016]. Dostupné na: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:12000/vyber-dispenzeru-podle-aplikace>
- [9] RoHS Guide, [online] [cit. 2016-03-26]. Dostupné na: <http://www.rohsguide.com/>
- [10] Heller Industries, „*The World's Best Convection Reflow Oven*“ [online] [cit. 2016-03-27]. Dostupné na: <http://www.hellerindustries.com/reflow-1826.php>
- [11] elchemco.cz, „*Tavidla pro měkké pájení v elektronice*“ [online] [cit. 2016-03-28]. Dostupné na: <http://web.elchemco.cz/tavidla-pro-mekke-pajeni-ra-rma-oa-sw-mil.php>
- [12] MACH, P., SKOČIL, V., URBÁNEK, J.: „*Montáž v elektronice, Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*“, ČVUT, 2001, ISBN 80-01-02392-3
- [13] smtcentrum.cz, „*Pájení v parách*“ [online] [cit. 2016-04-01]. Dostupné na: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-v-parach/pajeni-v-parach>

- [14] WONG, C.P. „*Fundamental Understanding and Performance Enhancement of Conductive Adhesive for Microelectronic Packaging Applications*„, 2008
[online] [cit. 2016-04-10]. Dostupné na:
https://cfpub.epa.gov/ncer_abstracts/index.cfm/fuseaction/display.highlight/abstract/6352/report/F
- [15] dfrsolutions.com, „*Failure Modes in Conductive Adhesives*“ [online] [cit. 2016-04-11]. Dostupné na: http://www.dfrsolutions.com/wp-content/uploads/2013/06/Conductive-adhesives-failure-modes_white-paper-130503-cat.pdf
- [16] SZENDIUCH, I. „*Propojování v elektronice - elektrické spoje a jejich realizace*„, [online] [cit. 2016-04-11]. Dostupné na:
[http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-06A-Propojov%C3%A1n%C3%AD%20v%20elektronice%20-%20elektrick%C3%A9%20spoj%C3%A9\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-06A-Propojov%C3%A1n%C3%AD%20v%20elektronice%20-%20elektrick%C3%A9%20spoj%C3%A9(Bc).pdf)
- [17] MORRIS, E.J., LIU, J. „*Electrically Conductive Adhesives (ECAs)* „, [online] [cit. 2016-04-14]. Dostupné na:
http://web.cecs.pdx.edu/~jmorris/Research%20&%20Publications/Electrically%20Conductive%20Adhesives/Chapter%20ECA%20Review%20in%20Suhir_Wong_Lee%20%28Springer%29.pdf
- [18] NING-CHENG, L. „*Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies* „, [online] [cit. 2016-04-16]. Dostupné na:
<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750672184>
- [19] HOLUB, R., VINTR, Z.: „*Spolehlivost letadlové techniky*“, VUT v Brně, fakulta strojního inženýrství, 2001
- [20] MACH, P. „*Modifikovaná elektricky vodivá lepidla*“ [online] [cit. 2016-04-28]. Dostupné na: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/528>

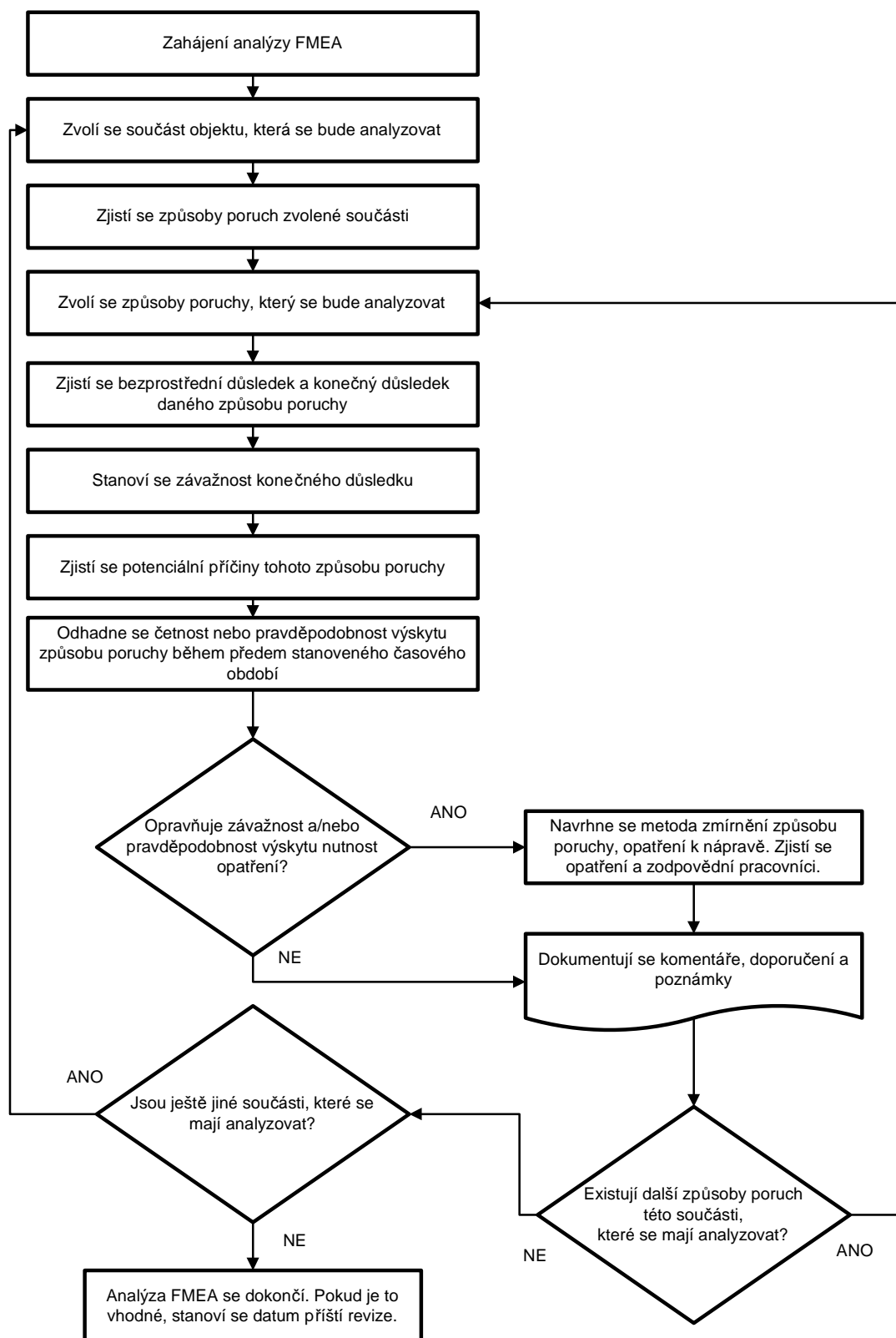
10 Seznam příloh

Příloha 1	Vývojový diagram FMEA analýzy
Příloha 2	Pracovní list FMEA analýzy pro proces pájení přetavením
Příloha 3	Strom poruch pro proces pájení přetavením
Příloha 4	Pracovní list FMEA analýzy pro proces vodivého izotropního lepení
Příloha 5	Strom poruch pro proces vodivého izotropního lepení
Příloha 6	CD s elektronickou verzí této diplomové práce ve formátu PDF

BIBLIOGRAFICKÉ ÚDAJE:

Jméno autora:	Bc. Roman Mahel
Obor:	Elektrotechnika, energetika a management - Elektroenergetika
Forma studia:	Kombinované studium
Název práce:	Analýza stromu poruchových stavů (FTA) a analýza možných vad a jejich důsledků (FMEA) procesu pájení a vodivého lepení v elektronice
Rok:	2016
Počet stran:	67
Počet použité literatury a informačních zdrojů:	20
Vedoucí práce:	Doc. Ing. Pavel Mach, CSc.

Příloha 1 Vývojový diagram FMEA analýzy [4]



Pracovní list FMEA analýzy pro proces pájení přetavením

* Kód odpovědné osoby:	1) Vedoucí kvality 2) Technik kvality 3) Vedoucí údržby	4) Technik údržby 5) Vedoucí skladu 6) Operátor	** Kód stavu analýzy	1) Čeká na zahájení 2) Zahájeno 3) Dokončeno	4) Uzavřeno
------------------------	---	---	----------------------	--	-------------

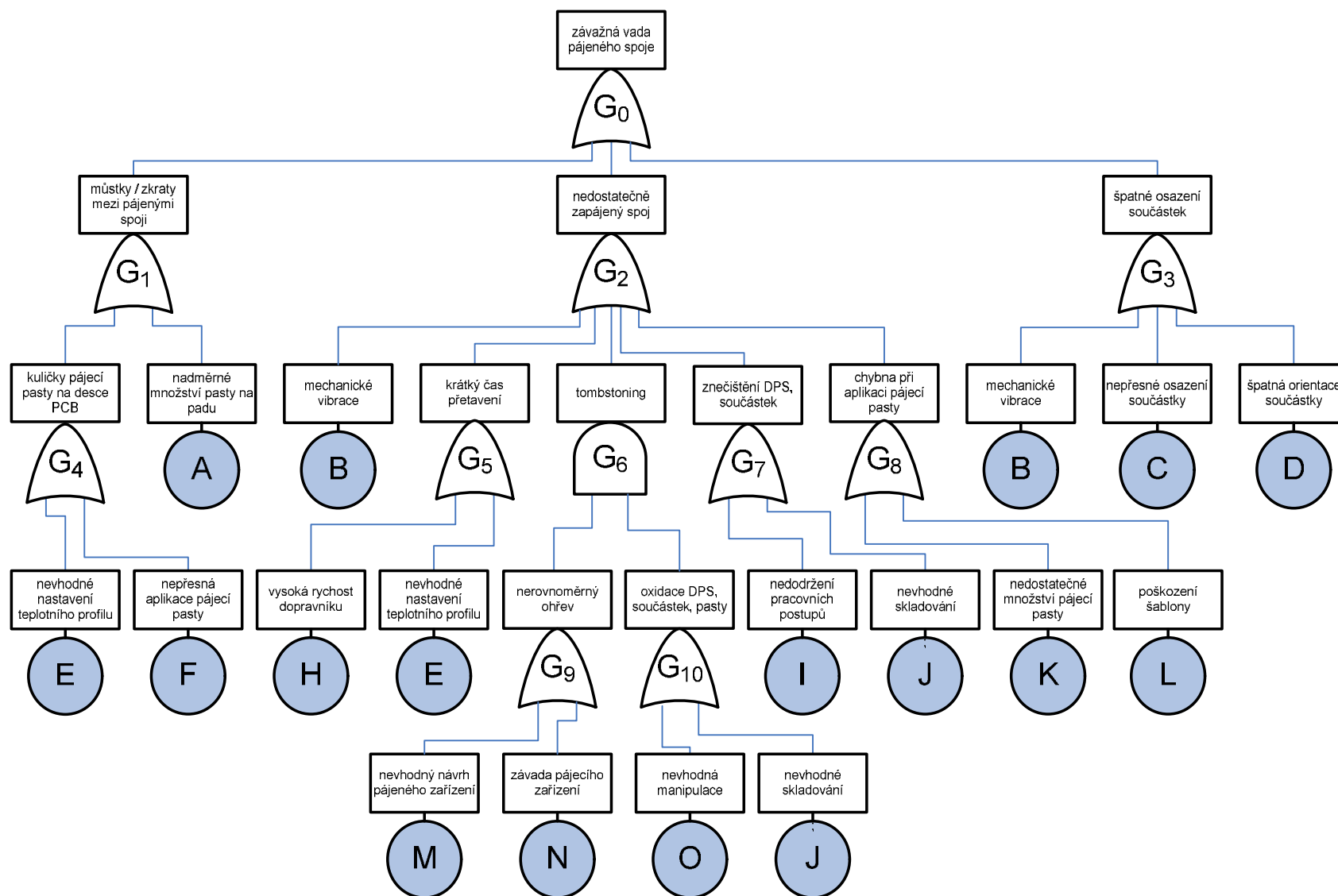
Příloha 2

Pracovní list FMEA analýzy pro proces pájení přetavením

Část		Název FMEA	Zpracoval	Revize		Datum		Oblast FMEA		Datum změny		Status				
2/2		FMEA pro proces pájení přetavením	Bc. Roman Mahel	R1A		21.4.2016		Osazování, pájení přetavením		21.4.2016		Zahájeno				
Funkce	Možná chyba	Možné důsledky	Možné příčiny	Význam	Detekce	Výskyt	RPN	Doporučené opatření	Odpovědná osoba*	Termín realizace	Provedená opatření	Význam	Detekce	Výskyt	RPN	Stav**
chlazení	pomalé chlazení	poškození pájeného spoje vlivem nedostatečného ochlazení a následné manipulace, trhliny v pájeném spoji vlivem manipulace s nedostatečně ztuhlé pájky, zvýšená oxidace pájky	chyba nastavení chladicího systému, závada na chladicím systému, nepřesné kontrolní měření teploty, zanedbaná údržba zařízení, závada dataloggeru	5	2	3	30	pravidelná kontrola nastavení teplotního profilu, kontrola a údržba zařízení, pravidelná kalibrace měřicích komponent a dataloggerů pro měření teplotních profilů	2,4	23.4.06	pravidelná kontrola nastavení teplotního profilu, kontrola a údržba zařízení, pravidelná kalibrace měřicích komponent a dataloggerů pro měření teplotních profilů	5	2	1	10	1
chlazení	rychlé chlazení	poškození pájených součástí vlivem teplotního šoku		6	2	1	12		2,4	23.4.06		6	2	1	12	1
nanášení pájecí pasty	nedostatečné množství pájecí pasty	nedostatečně zapájené spoje, snížená proudová zatížitelnost spoje a mechanická pevnost spoje, v kombinaci s dalšími faktory možnost zvedání součástek (tombstoning)	chybná nastavení procesu nanášení pájecí pasty, špatná kvalita pájecí pasty, porucha zařízení zajišťující nanášení pasty	6	2	5	60	optická kontrola nanesené pasty, kontrola nastavení procesu nanášení pasty, kontrola kvality pájecí pasty, údržba a čištění zařízení	2,4	21.4.06	optická kontrola nanesené pasty, kontrola nastavení procesu nanášení pasty, kontrola kvality pájecí pasty, údržba a čištění zařízení pro nanášení pasty	6	2	2	24	1
nanášení pájecí pasty	nadbytečné množství pájecí pasty	tvorba můstků, zbytky pasty na desce PCB	chyba nastavení procesu nanášení pájecí pasty, možný problém šablony	7	2	5	70	optická kontrola množství nanesené pasty, kontrola nastavení procesu nanášení pasty, kontrola šablony, serřízení	2,4	21.4.06	optická kontrola množství nanesené pasty, kontrola nastavení procesu nanášení pasty, kontrola šablony, serřízení	7	2	2	28	2
nanášení pájecí pasty	nepřesná aplikace pájecí pasty, pájecí pasta mimo pady	tvorba můstků nebo nezapájené spoje, přebytková pájecí pasta na nesprávných místech	chybný sůtisk, špatné sezazení DPS a šablony, možný mechanický problém šablony nebo držáku, údržba a pravidelné čištění	9	2	5	90	optická kontrola sůtisku pájecí pasty, kontrola šablony, držáku DPS	2,4	21.4.06	kontrola naneseného motivu před osazením, pravidelná kontrola procesu nanášení, kontrola zařízení, údržba a srřízení zařízení	9	2	3	54	2
nanášení pájecí pasty	oxidace pájecí pasty	zhoršená kvalita spoje, nezapájené spoje, tombstoning	nevhodné podmínky skladování, nevhodná manipulace, překročení data použitelnosti, nedodržení technologického postupu nanášení	7	5	4	140	zajištění vhodných skladovacích podmínek, správná manipulace, kontrola skladovacích podmínek, evidence skladových pohybů, kontrola data spotřeby, dodržení technologického postupu	5,2	22.4.06	periodické kontrola skladových zásob, kontrola skladovacích podmínek, specifikace pro práci s pájecí pastou	7	5	2	70	1
nanášení pájecí pasty	vysoká viskozita pasty	zhoršená kvalita spoje, nezapájené spoje, nedostatek pájecí pasty na pájených plochách v důsledku vysoké viskozity pájecí pasty, tombstoning	nevhodné podmínky skladování, nevhodná manipulace, překročení data použitelnosti	8	4	4	128	zajištění vhodných skladovacích podmínek, správná manipulace, kontrola skladovacích podmínek, evidence skladových pohybů, kontrola data spotřeby	5,2	22.4.06	periodické kontrola skladových zásob, kontrola skladovacích podmínek, specifikace postupu pro práci s pájecí pastou	8	4	2	64	1
osazení součástek	špatná orientace součástky	zapájení špatně orientované součástky	nastavení osazovacího automatu, chyba balení součástek	10	5	5	250	nastavení, kontrola orientace součástek před vložením do osazovacího automatu	6	21.4.06	optická kontrola osazení, kontrola orientace součástek před osazením	10	5	2	100	2
osazení součástek	nepřesné osazení součástky	nezapájené vývody, tvorba můstků	nastavení osazovacího automatu	10	2	6	120	optická kontrola osazení, seřízení osazovacího automatu	4,6	21.4.06	optická kontrola osazení, seřízení osazovacího automatu	10	2	3	60	2
* Kód odpovědné osoby:				1) Vedoucí kvality		4) Technik údržby		** Kód stavu analýzy		1) Čeká na zahájení		4) Uzavřeno				
				2) Technik kvality		5) Vedoucí skladu				2) Zahájeno						
				3) Vedoucí údržby		6) Operátor				3) Dokončeno						

Příloha 3

Strom poruch pro proces pájení přetavením



Pracovní list FMEA analýzy pro proces vodivého izotropního lepení

* Kód odpovědné osoby:

Příloha 5

Strom poruch pro proces vodivého izotropního lepení

